

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## BEZDRÁTOVĚ ŘÍZENÁ SADA SVĚTELNÝCH KONTROLERŮ PRO ŽIVÁ VYSTOUPENÍ

A WIRELESSLY-CONTROLLED SET OF LIGHT CONTROLLERS FOR LIVE PERFORMANCE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jakub Pecháček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Štáva, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Jakub Pecháček

**ID:** 164356

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### **Bezdrátově řízená sada světelných kontrolerů pro živá vystoupení**

## POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a realizujte bezdrátovou sadu speciálních světelných kontrolerů pro živá vystoupení před publikem. Zařízení musí být kompaktní a přenosné, vhodné pro připevnění na pohybující se osobu. Pro část vysílací i přijímací použijte integrovaný obvod nRF52832 od firmy Nordic Semiconductor. Řízení celku bude možné pomocí počítačového programu, komunikace počítače s vysílačem bude probíhat pomocí některého stávajícího komunikačního standardu z jevištní osvětlovací techniky. Proveďte dále rešerši komunikačních standardů v jevištní osvětlovací technice, topologií bezdrátové komunikace, světelných prvků připevnitelných na člověka a vhodných pro živá vystoupení.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Štáva, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a výrobou bezdrátově ovládané světelné kontroléry které najdou své uplatnění v divadle při živých vystoupeních nebo u netradičních tanečních souborů. Výsledek této práce zajistí plnou kontrolu nad řízenými světly a zajistí i jejich napájení po dobu vystoupení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

DMX512, stmívač, budič, optické vlákno, elektroluminiscence, nRF52832, Bluetooth

## ABSTRACT

This paper describes the design and manufacture wirelessly controlled set of light controllers. They will find their place in the theater for live performances or non-traditional dance ensembles. The result of this work will ensure full control over the controlled lights and provide them power over live performance.

## KEYWORDS

DMX512, Dimmer, Driver, Optical fibre, Electroluminescence, nRF52832, Bluetooth

PECHÁČEK, Jakub *Bezdrátově řízená sada světelných kontrolerů pro živá vystoupení*. Brno, 2016. 54s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Martin ŠTÁVA



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Bezdrátově řízená sada světelných kontrolerů pro živá vystoupení“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Šťávovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Současný stav řešené problematiky</b>	<b>11</b>
1.1 Ovládání osvětlovací techniky . . . . .	11
1.1.1 Ruční řízení . . . . .	11
1.1.2 Počítačové řízení . . . . .	11
1.2 Přenos řídicích povelů . . . . .	12
1.2.1 Vybrané protokoly digitální komunikace . . . . .	13
1.2.2 Bezdrátový digitální přenos . . . . .	14
1.3 Řízení osvětlení . . . . .	14
1.4 Světelné zdroje . . . . .	15
<b>2 Porovnání možných řešení</b>	<b>16</b>
2.1 Ovládání osvětlovací techniky . . . . .	16
2.2 Přenos řídicích povelů . . . . .	17
2.3 Řízení osvětlení . . . . .	17
2.3.1 Nordic Semiconductor nRF52832 . . . . .	17
2.3.2 Podporované bezdrátové komunikační protokoly nRF52832 . . . . .	18
2.3.3 Topologie bezdrátové komunikace . . . . .	19
2.4 Světelné zdroje . . . . .	19
<b>3 Návrh vlastního řešení</b>	<b>20</b>
3.1 Řídicí program v počítači . . . . .	20
3.2 Přenos dat z počítače do vysílače . . . . .	20
3.3 Přenos dat z vysílače do kontrolérů . . . . .	20
3.4 Řízení světelných zdrojů . . . . .	21
<b>4 Návrh hardware</b>	<b>22</b>
4.1 Mikrokontrolér nRF52832 . . . . .	22
4.1.1 Nahrávání a ladění programu . . . . .	22
4.2 Zesilovač signálu . . . . .	22
4.3 Vysílač . . . . .	22
4.3.1 Napájení . . . . .	23
4.3.2 Komunikace s počítačem . . . . .	23
4.4 Přijímače . . . . .	24
4.4.1 Napájení . . . . .	24
4.4.2 Vstupy a výstupy . . . . .	25
4.4.3 Rozměry a hmotnost . . . . .	26

4.5	Budiče LED . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Programové vybavení mikrokontrolérů</b>	<b>27</b>
5.1	Software development kit . . . . .	27
5.2	Periferie mikrokontroléru . . . . .	27
5.2.1	General-purpose input/output . . . . .	27
5.2.2	PWM . . . . .	28
5.2.3	Časovače . . . . .	28
5.2.4	AD převodník . . . . .	29
5.2.5	UART . . . . .	29
5.3	DMX512 dekodér . . . . .	30
5.3.1	Podoba dat a časování . . . . .	30
5.3.2	Využití UART pro dekódování . . . . .	31
5.3.3	Triple buffering . . . . .	31
5.4	Bluetooth Low Energy v4.2 . . . . .	31
5.4.1	Navázání spojení . . . . .	32
5.4.2	Vrstvy Bluetooth Low Energy (BLE) . . . . .	32
5.4.3	Zavedené služby a charakteristiky . . . . .	34
5.4.4	Komunikace . . . . .	34
5.4.5	SoftDevice . . . . .	34
5.5	Linearizace jasu LED pro lidské oko . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Výroba, oživení a testování</b>	<b>37</b>
6.1	Výroba a oživení hardwaru . . . . .	37
6.2	Impedanční přizpůsobení vysílací antény . . . . .	37
6.3	Dosah vysílače . . . . .	38
6.4	Rychlost navázání spojení . . . . .	38
	<b>Závěr</b>	<b>39</b>
	<b>Literatura</b>	<b>40</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratek</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>46</b>
<b>A</b>	<b>Protokoly</b>	<b>47</b>
A.1	DMX512-A . . . . .	47
A.2	RDM . . . . .	47
A.3	ACN . . . . .	48
A.4	ART-Net . . . . .	48

<b>B</b>	<b>Hardware</b>	<b>49</b>
B.1	Schémata . . . . .	49
B.2	Impedanční přizpůsobení antény . . . . .	52
<b>C</b>	<b>Fotodokumentace</b>	<b>53</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Řetězec ovládání jevištní osvětlovací techniky . . . . .	10
3.1	Přenos dat do vysílače (čísla bloků odpovídají číslům na obrázku 1) .	20
3.2	Přenos dat do přijímačů (čísla bloků odpovídají číslům na obrázku 1)	21
5.1	AD převodník v mikrokontroléru; [25] . . . . .	29
5.2	Podoba DMX512 dat; Zdroj: < <a href="https://www.freestylersupport.com/wiki/dmx_basics:dmx_timing">https://www.freestylersupport.com/wiki/dmx_basics:dmx_timing</a> > . . . . .	30
5.3	Jednotlivé vrstvy BLE [25] . . . . .	33
5.4	CIE1931 převodní křivka; Zdroj: < <a href="http://photonstophotos.net/GeneralTopics/Exposure/Psychometric_Lightness_and_Gamma.htm">http://photonstophotos.net/GeneralTopics/Exposure/Psychometric_Lightness_and_Gamma.htm</a> >	36
B.1	USB část vysílače . . . . .	49
B.2	Napájecí část přijímače . . . . .	49
B.3	Hlavní část vysílače . . . . .	50
B.4	Hlavní část přijímače . . . . .	51
B.5	Činitel odrazu vysílače - S11 . . . . .	52
C.1	Přijímač bez krabičky . . . . .	53
C.2	Vysílač v krabici bez krytu . . . . .	53
C.3	Budiče LED . . . . .	54
C.4	Fotka z vystoupení - Medúzy . . . . .	54

# ÚVOD

Zaujmout a překvapit je zajisté cíl nejednoho divadelního či jiného vystoupení pro diváky. Ať je vystoupení dlouhé nebo krátké, může nabídnout něco nového a běžně neviděného. Tím novým a běžně neviděným by mohl být výsledek této bakalářské práce.

Zpočátku používané světlo z plamene ohně bylo později nahrazeno Edisonovým vynálezem žárovky a dalšími podobnými zdroji světla. Na potřebu zajistit dostatek světla navázala potřeba nasvítit jen části vystoupení. K tomu se využívá několik zdrojů světla rozmístěných v okolí jeviště s různými tvary světelného kuželu a jsou rozsvěceny podle potřeby. Blokové schéma jejich fungování je na obrázku 1.



Obr. 1: Řetězec ovládání jevištní osvětlovací techniky

Připevnit svítící prvky na účinkující a různě je podle dané choreografie rozsvěcet pro vytvoření vizuálních, tanečních a jiných kreací se jeví jako velice zajímavý prvek v moderním pojetí spojení divadla a tance.

K dosažení tohoto cíle je využito několika metod počínaje průzkumem dosavadních řešení a poté jejich zhodnocením a výběrem vhodné cesty při následném řešení.

Práce je členěna do šesti kapitol, ve kterých se zprvu zjišťují možnosti dílčích částí řešení, poté se zvažuje nejvhodnější řešení a nakonec je popsána samotná realizace.

# 1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Potřeba světla při různých představeních je stejně stará jako představení sama. Když se vytratí denní světlo nebo je představení v budově, je zapotřebí zajistit dostatek světla na to, aby bylo vystoupení vůbec vidět.

## 1.1 Ovládání osvětlovací techniky

Ovládání osvětlovací techniky lze rozdělit na dva hlavní způsoby[1]: ruční a počítačové.

### 1.1.1 Ruční řízení

Při ručním řízení osvětlení se využívají převážně jednoduché stmívače světél. Řízení stmívačů se dělí na tři způsoby[2]: Mechanické, Elektrické a Elektronické.

**Mechanické ruční řízení** Stmívače jsou ovládány jednotlivě, nejčastěji otočným kolem nebo pákou[2]. Často jsou pospojovány táhly nebo hřídelemi. Není možné je jakkoliv přednastavit a jsou tedy ovládány jedine živě.

**Elektrické ruční řízení** Stmívače a jejich ovládání je stejné jako u mechanického ručního řízení. Co je však jiné, je seskupování stmívačů pod jiné stmívače[2]. To dává možnost přednastavit osvětlení a jedním stmívačem ho uplatnit. Nevýhodou je nutnost použití velmi výkonných stmívačů, které musí pokrýt maximální výkon všech stmívačů k nim připojených. Pokud jeden stmívač ovládá pět 1kW stmívačů, musí být sám stavěn minimálně na 5kW zátěž. Seskupování se dá provádět i v několika úrovních.

**Elektronické ruční řízení** U tohoto typu řízení jsou odděleny silové a řídicí obvody. K silové části jsou připojeny stmívače a jsou řízeny nízkonapětovými signály[2]. To dovolu je umístit ovládání dál od osvětlovací techniky. Samotné ovládání je poté prováděno z ovládacího pultu pomocí potenciometrů a dalších elektronických součástek.

### 1.1.2 Počítačové řízení

Předností tohoto způsobu je značná variabilita a konfigurovatelnost[2][1]. Počítačové řízení těži zejména z vlastní paměti a umožňuje přednastavit různé sekvence a makra. S počítačovým řízením se změnilo i samotné osvětlení a nabízí tak nové funkce. Je



možné řídit natáčení světel a další jejich funkce. Operátor má mnohem snazší práci, jelikož jsou základní operace přednastaveny a plynulost změn osvětlení nemusí být ovlivněna člověkem, ale předem nastavenou změnou. Řízení počítačem prakticky neomezuje v počtu použitých řízených světel.

**Řízení pomocí speciálních konzol a pultů** Ve své podstatě to jsou také počítače, jen jsou přizpůsobené na řízení osvětlení. Nabízí několika násobně větší ovládací plochu proti klávesnici počítače.

**Řízení počítačovým programem** Aby bylo možné využít počítač pro řízení osvětlení, je nutné ho vybavit speciálním programem, který svou funkcí zastoupí speciální konzole a ovládací pulty.

## 1.2 Přenos řídicích povelů

Druhý blok z obrázku 1 řeší způsob, jakým je řídicí informace předána do zařízení řídicí samotný světelný zdroj nebo zdroje. Výběr způsobu přenosu je omezen použitým typem řízení.

### Ruční řízení

- Mechanické ruční řízení – pomocí napájení
- Elektrické ruční řízení – pomocí napájení
- Elektronické ruční řízení – pomocí analogového signálu s úrovní odpovídající intenzitě svitu s maximem nejčastěji při 24V

**Počítačové řízení** Zpočátku každá firma vyrábějící zařízení pro jevištní osvětlovací techniku si vymýšlela vlastní protokoly digitální komunikace. Bylo často zapotřebí zachovat stávající analogově řízené osvětlení. Proto se využívaly digitálně analogové převodníky kompatibilní s protokolem výrobce ovládacího pultu. Z těchto protokolů je vhodné jmenovat AMX192 jako „Analog Multiplex Data Transmission“, který mohl obsloužit až 192 analogových stmívačů[4]. Tento protokol byl později nahrazen více univerzálnějším, čistě digitálním, protokolem DMX512. I nadále se hledaly cesty, jak tento protokol vylepšit nebo nahradit. Vzniklo mnoho protokolů přenášejících zpravidla více DMX512 signálů po ethernetu. Přítomnost čistě proprietárních protokolů je i v dnešní době velmi častá.

## 1.2.1 Vybrané protokoly digitálního komunikačního

### DMX512-A

V roce 1986 byl vytvořen původní standard DMX512 institutem USITT – „United States Institute for Theatre Technology“. Oficiální standard DMX512-A vznikl až v roce 1999 jako „Entertainment Technology – USITT DMX512-A (IEC 62136)“.

Další vývoj standardu převzala „ESTA Technical Standards Program“ jako „ANSI E1.11-2008 (R2013)“ s poslední revizí v roce 2013[5].

Standard upravuje použití kabelů, jejich připojení k vybraným konektorům, úroveň signálů a samotný komunikační protokol. Akronym DMX512 vychází ze slov „Digital Multiplex“ a číslovka 512 značí počet adresovatelných bitů nazývaných anglicky „universe“[6]. Od DMX512 a DMX512-A bylo odvozeno několik dalších protokolů, které jsou zpětně kompatibilní.

Více o tomto protokolu je napsáno v příloze A.1

### RDM, RDMNet, Streaming-RDM

Rozšiřuje DMX512-A o možnost zpětné komunikace a také umožňuje vzdálené nastavení adres zařízení, které podporují tento protokol podle „ANSI E1.20 - 2010“[9]. Zpětná komunikace se dá využít například pro kontrolu teploty a indikaci selhání zařízení. Akronym RDM vychází z „Remote Device Management“.

Více o tomto protokolu je napsáno v příloze A.2

**RDMNet** a **Streaming-RDM** tuto zpětnou komunikaci přináší i na sACN jako „ANSI BSR E1.33“[12][13].

### ACN, sACN

Síťový protokol vhodný pro opravdu velké instalace vydaný roku 2006 s poslední revizí v roce 2015 jako „ANSI E1.17-2015“[10]. Akronym ACN vychází z „Architecture for Control Networks“.

Více o tomto protokolu je napsáno v příloze A.3

**sACN** kompatibilní s původním ACN a slouží pro přenos DMX512 pomocí protokolu ACN jako „ANSI E1.31 - 2016“[11][13].

### Art-Net

Přenáší DMX512-A nebo RDM pomocí ethernetu a TCP/IP a je zveřejněn pod Artistic License. Proti ACN je Art-Net mnohem jednodušší na implementaci. Zařízení jsou identifikovatelná pomocí 6 bytové MAC adresy přidělené specializovanou organizací. Byl vyvinut v roce 2002 [15][14].

Více o tomto protokolu je napsáno v příloze A.4

## A další protokoly:

- **ETCNet:** Proprietární protokol firmy ETC využívající ethernet  
**ETCNet 2:** 1997  
**Net 3:** nejnovější
- **KiNET:** Proprietární protokol firmy „Color Kinetics“ – ethernet a UDP pakety na portu 6038
- **Shownet:** Proprietární protokol firmy „Strand“
- **ESP Net:** Proprietární protokol firmy „Enttec“ DMX512 po ethernetu
- **SandNet:** Proprietární protokol firmy „Sandsys“. Rozhraní mezi různými ethernetovými protokoly od různých firem. Obousměrná komunikace
- **Pathport:** Proprietární protokol firmy „Pathway“ DMX512 po ethernetu pomocí broadcastu
- a ještě několik dalších: OLA, CITP, Philips Hue, the Insta/ROBE, Eurolite T9, ColourSmart Link, Colorlight A8, Colorlight 5A, Colorlight T9, ASIO, MA-Net, MIDI, Time Code

### 1.2.2 Bezdrátový digitální přenos

V této oblasti je téměř neomezená volnost volby typu bezdrátového přenosu. Nejčastěji je vstup vysílače a výstup přijímače standard DMX512-A a je tím zaručena velká kompatibilita s ostatními zařízeními s výhodou bezdrátového přenosu na části vedení signálu[16].

## 1.3 Řízení osvětlení

Blok 3 z obrázku 1 má na starost zejména přečtení, a dekodování zprávy přenesené pomocí bloku 2 z obrázku 1 a zajištění provedení požadavku. To může být nastavení intenzity svitu světla nebo u složitějších a většinou digitálních systémů i natáčení světla a další jeho funkce[3].

Některá žhavená světla potřebují před použitím pomalu zahřát a udržovat zahřátá, jinak se jim velmi zkrátí životnost při prudkém rozsvícení[20].

### Vybrané typy řízení intenzity osvětlení

**Stmívače.** Stmívač, jak název napovídá, slouží k regulaci jasů. Jsou použitelné pro světelné zdroje, které se mohou řídit změnou napájecího napětí. Základní druhy stmívačů[3][20]:

- Reostatové - Velké ztráty, musí být nastaveny pro konkrétní zátěž

- Transformátor s natáčenou cívkou - Stator a rotor bez komutátoru (natáčení max o  $90^\circ$ ), Využívá změny napětí při různém natočení dvou cívek.
- Autotransformátorové - Nezajišťují galvanické oddělení, ale jsou vhodnější zejména pro svou jednoduchost a cenu.
- Polovodičové - Volitelný čas opožděného sepnutí sinusové půl periody napájecího napětí mění hodnotu efektivního napětí přiváděného do řízeného světla. Je ztraceno minimum výkonu. Využívají tyristorů, triaků a IGBT tranzistorů jako hlavních spínacích součástek.

**LED budiče.** Též známe pod anglickým označením „LED driver“. Pro velikou odlišnost LED technologie od žhavených zdrojů světla jako žárovek je nutné použít i jiné řízení intenzity svitu. LED vyžadují řízení proudem a nikoliv napětím[21]. Je to z důvodu teplotní závislosti velikosti proudu na napětí, kdy s rostoucí teplotou čipu vzrůstá i procházející proud při stejném napětí a mohlo by dojít až ke zničení LED.

## 1.4 Světelné zdroje

V jevištní osvětlovací technice se využívá velkého množství rozličných zařízení osvětlujících scénu znázorněných jako čtvrtý blok obrázku1. Obecně se dají rozdělit na světlomety a reflektory[1][2].

- **Světlomety:** slouží pro osvětlení většího prostoru měkkým světlem
- **Reflektory:** naopak zvýrazňují jimi nasvícenou scénu a mají jasně ohraničený světelný kužel.

Obě tyto kategorie se dají dále dělit, a i přesto do nich lze jen stěží zařadit osvětlení, lépe řečeno svítící prvky, připevnitelné na člověka.

Toto osvětlení na člověku najde své uplatnění zejména v černém divadle a podobných vystoupeních, kde není přítomné světlo z jevištních světél nebo ho je minimum. Kdyby tomu tak nebylo, tak by se slabý svit přenosných světél na člověku ztratil v záři jevištních reflektorů a světlometů, které svým příkonem lehce překonávají kW hranici.

### Vybrané svítící prvky připevnitelné na člověka

- **Bodové zdroje světla:** Žárovka, Záblesková výbojka, LED, Optické vlákno s LED
- **Pruhové zdroje světla:** LED pásek, LED Neon Flex, Bočně vyzařující optické vlákno s LED, Elektroluminiscenční drát, Elektroluminiscenční pásek, Fibrance vlákno s laserem
- **Plošné zdroje světla:** Elektroluminiscenční plocha, LED panel

## 2 POROVNÁNÍ MOŽNÝCH ŘEŠENÍ

V této kapitole jsou shrnuty zejména výhody a nevýhody jednotlivých přístupů k řešení zadání.

### 2.1 Ovládání osvětlovací techniky

**Ruční řízení** je nevyhovující, protože neumožňuje bezdrátovou komunikaci.

**Počítačové digitální řízení** má řadu předností proti ručnímu a umožňuje zejména:

- bezdrátovou komunikaci
- spouštět předem nastavené sekvence

Při výběru počítačového digitálního řízení je nutné volit mezi ovládáním pomocí počítače nebo specializovaného pultu či konzole. Specializované pulty a konzole jsou levnější než počítač, ale při náročnějším použití jsou složitější a jejich cena rychle roste. Proti počítači nabízejí větší komfort a přehled nad nastavením.

Samotný počítač nebo notebook dokáže zastoupit funkci specializovaných ovládacích pultů a komfort při ovládání je omezen pouze velikostí obrazovky a použitou periferií na ovládání: myš, klávesnice, dotyková obrazovka a další. Připojení k osvětlovací technice se provádí skrz rozhraní připojitelná do USB portu nebo využitím ethernetu. Počítač je také nutné vybavit nějakým programem určeným pro osvětlovací techniku podporující zvolený komunikační protokol a zvolené rozhraní.

**Výběr programů pro řízení osvětlovací techniky z počítače:**

- **Open source nebo Freeware**
- Q Light Controller+ <http://www.qlcplus.org/>
- Vixen Lights <http://www.vixenlights.com/>
- FreeStyler3 <http://users.telenet.be/freestylerdmx/>
- DMXControl 3 <http://www.dmxcontrol.org/dmxcontrol3/features.html>
- MagicQ <https://secure.chamsys.co.uk/magicq>
- **Placené**
- Cast Vivien <http://www.cast-soft.com/vivien/>
- MediaMaster Express <http://www.arkaospro.com/software/mediamaster-express>
- Sunlite Suite 2 <https://www.nicolaudie.com/cs/suite2.htm>
- LightFactory V2 [http://www.lightfactory.net/Introducing\\_LightFactory\\_Lighting\\_Without\\_Limits\\_.html](http://www.lightfactory.net/Introducing_LightFactory_Lighting_Without_Limits_.html)
- Madrix 3 <http://www.madrix.com/en/home/products/madrix/madrix-3.html>

Výběr vhodného programu je závislý na použitém operačním systému a finančních prostředcích. Často jsou programy dostupné volně ke stažení, ale jsou vázány pouze na rozhraní jedné firmy nebo slouží jako rozšíření funkcí pokročilého ovládacího pultu nebo konzole. Některé programy mají podporu mobilních zařízení jako telefonů a tabletů, a umožňují tak vzdálenou správu a základní přenastavování.

## 2.2 Přenos řídicích povelů

Volba komunikačního protokolu musí respektovat nároky na délku vedení a přenášené množství dat.

**DMX512-A a RDM.** Tyto protokoly jsou omezeny na 512 bytů dat s obnovovací frekvencí přibližně 44 Hz. Pokud je potřeba posílat nová data rychleji v kratších časových prodlevách, je nutné omezit jejich odesílaný počet.

**ACN a Art-Net.** Jejich volba je na místě, pokud je potřeba přenášet opravdu hodně dat pro velké množství světel s hodně parametry. Dokáží zastat několik DMX512-A vedení naráz.

## 2.3 Řízení osvětlení

Využití stmívačů je vhodné pouze pro statickou instalaci. Všechna jiná použití jsou značně omezená.

V zadání této práce je uvedeno využití integrovaného obvodu nRF52832 firmy Nordic Semiconductor, využitelného při bezdrátové komunikaci, o kterém je následující podkapitola.

### 2.3.1 Nordic Semiconductor nRF52832

Tento integrovaný obvod v podobě „System on Chip“ (SoC) je nástupcem obvodů nRF51822 a nRF51422, které se od sebe lišily podporou technologie ANT pro bezdrátovou komunikaci.

nRF52832 spojuje oba předchozí modely a přidává další nové funkce a vlastnosti. Tento SoC integruje ARM jádro Cortex-M4F a je k němu připojeno 256 nebo 512KB FLASH paměti a 32 nebo 64KB RAM. Mikroprocesor podporuje takt až 64MHz při spotřebě 58μA/MHz. Periferie okolo mikroprocesoru jsou zastoupeny v hojném počtu a činí tak z tohoto SoC velice univerzální prvek, což na něm umožňuje založit celé zařízení.

**Rádiový modul.** Pro bezdrátovou komunikaci je tento SoC vybaven transceiverem v pásmu 2.4GHz

- vysílací výkon  $-20$  až  $+4$ dBm
- citlivost až  $-96$ dBm při provozu Bluetooth protokolu
- přenosová rychlost 1 nebo 2Mbps

## **2.3.2 Podporované bezdrátové komunikační protokoly nRF52832**

### **Bluetooth Low Energy v4.2**

Pro použití tohoto protokolu dodává firma Nordic Semiconductor „SoftDevice“. Je to již zkompileovaná knihovna pro podporu Bluetooth na tomto integrovaném obvodu a pro její obsluhu je dodáván hlavičkový soubor.

### **Bluetooth 5**

S finálním oficiálním vydáním specifikací pro Bluetooth 5 byla oznámena částečná podpora této verze i pro tento integrovaný obvod. Výrobce v současné době dodává všechny materiál potřebný pro zahájení vývoje aplikací s tímto protokolem. Bluetooth 5 nabízí větší velikost předávaných zpráv a také navyšuje rychlost komunikace na krátké vzdálenosti.

### **ANT**

Podporu tohoto protokolu zajišťuje firma Dynastream Innovations a také dodává příslušný SoftDevice.

### **Enhanced ShockBurst™**

Knihovna je součástí SDK od výrobce. ESB je proti Bluetooth mnohem jednodušší a lépe využívá omezenou šířku pásma. Nenabízí však frekvenční skákání nebo šifrování přímo v protokolu.

### **Gazell**

V současném SDK není podporováno, ale je plánováno.

### **Možnost návrhu vlastního protokolu**

Plný přístup k rádiovému modulu je omezen maximální délkou vysílaného rámce. Možnost souběhu více protokolů pomocí časového sdílení rádiového modulu – „Timeslot API“ je součástí SDK.

### 2.3.3 Topologie bezdrátové komunikace

#### Hvězda – „Star“

Jeden řídicí uzel řídí několik na něm závislých zařízení

#### Strom – „Tree“

Každý uzel komunikuje pouze s k němu podřízenými uzly sítě

#### Smíšená – „Mesh“

Každý uzel může komunikovat s kterýmkoliv dalším uzlem v jeho dosahu

## 2.4 Světelné zdroje

Výběr světelného zdroje velmi záleží na celkovém, částečně subjektivním, dojmu z celku a na konkrétních potřebách. Od jeho výběru se řídí i typ použitého řízení.

**Žárovky** je vhodné spíše nedoporučit pro výběr z důvodu vysoké spotřeby a nízké intenzity svitu.

**LED** zdroje světla jsou naopak velmi vhodné pro připevnění na oděv vystupujícího člověka. Vysoká účinnost, široká nabídka barev, velikost, životnost, speciální vícebarevné a různě výkonné typy jsou hlavními výhodami tohoto zdroje světla.

**Elektroluminiscence** je velice zajímavý zdroj světla. Vyrábí se v několika barvách a zejména v provedeních jako drát, pásek nebo větší plocha. Přednost proti LED je homogenita svitu po celé aktivní části. Nevýhody jsou krátká životnost a složité napájení vyžadující střídavé napětí nad 100 V.

**Optická vlákna** jsou podobná elektroluminiscenčním drátům. S narůstající délkou v nich vzniká útlum svitu. U bočně vyzařujícího optického vlákna je tento jev okem znatelný již u délek kratších než 1 m a závisí i na kvalitě vlákna.

**Fibrance vlákno s laserem** se opět podobá elektroluminiscenčním drátům a optickým vláknům, ale zdrojem světla je laser. Toto řešení vyrábí pouze jedna firma a jeho cena je velmi vysoká v porovnání s předchozími řešeními.



## 3 NÁVRH VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

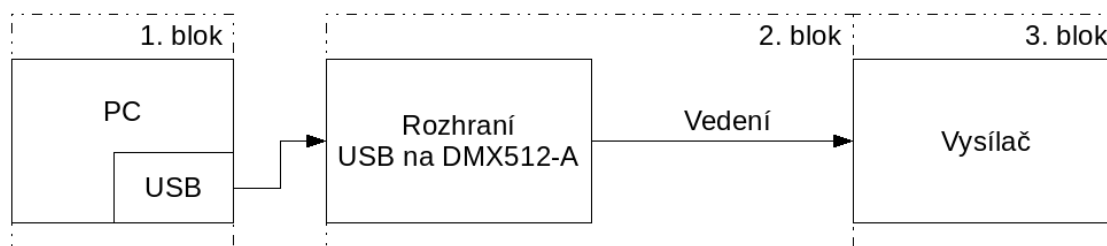
U každé jednotlivé části řešení byly zváženy možnosti diskutované v předchozích kapitolách a jejich výběr je popsán v kapitolách následujících.

### 3.1 Řídící program v počítači

Pro relativně velké množství svítících prvků na oblecích je nemyslitelné ovládat je ručně. Z toho důvodu je vybráno řízení počítačem. Pro účel kompletního řízení byl vybrán program QLC+ hned z několika důvodů:

- multiplatformní: Linux, Windows, OSX
- open source pod Apache 2.0 licencí
- podpora velkého množství rozhraní a komunikačních protokolů
- aktivní vývoj

### 3.2 Přenos dat z počítače do vysílače

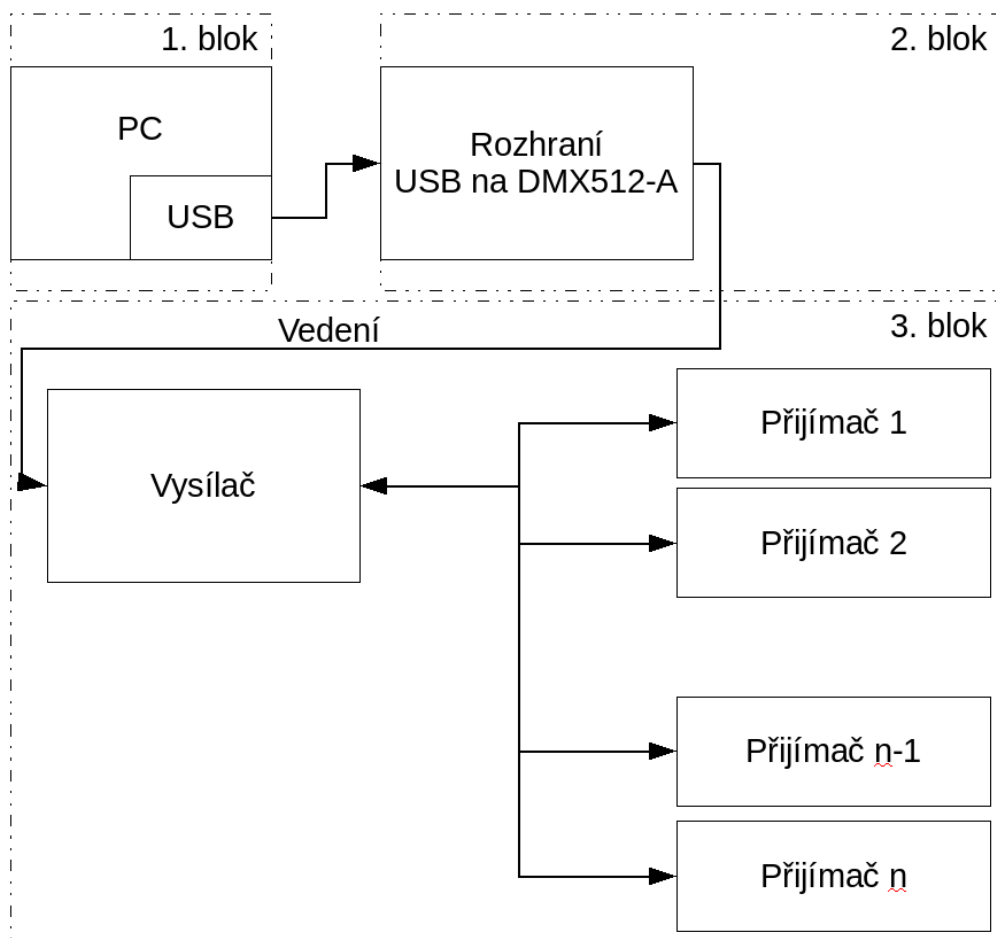


Obr. 3.1: Přenos dat do vysílače (čísla bloků odpovídají číslům na obrázku 1)

Pro přímou komunikaci počítače a vysílače bude využito Universal Serial Bus (USB) pro jeho snadné připojení k počítači a existující převodníky na DMX512, které bude dále použito jen v rámci vysílače. Jako převodník z USB na DMX512 bude využit obvod firmy FTDI FT232R, který je podporován programy na řízení osvětlení.

### 3.3 Přenos dat z vysílače do kontrolérů

Komunikace bude přenášena pomocí BLE v4.2. To zajistí v budoucnosti dobrou rozšiřitelnost o jiné zařízení jak z pohledu vysílače tak přijímačů. Případný přechod na Bluetooth 5 by byl také mnohem jednodušší než při přechodu z jiných možných protokolů.



Obr. 3.2: Přenos dat do přijímačů (čísla bloků odpovídají číslům na obrázku 1)

Na obrázku 3.2 je znázorněno postavení bezdrátového vysílače vůči přijímačům. Každý přijímač bude spojen s vysílačem pomocí unicast spojení a bude dostávat pouze data určená jemu.

### 3.4 Řízení světelných zdrojů

Jelikož není možné vyrobit univerzální budič či stmívač pro všechny typy světelných zdrojů, bude budič vždy součástí zdroje světla a nikoliv bezdrátového kontroléru. Kontrolér bude poskytovat pouze napájení a PWM signál se střídou odpovídající intenzitě žádaného svitu. Jako příklad bude vyhotoven LED budič se čtyřmi nebo osmi nezávislými kanály pro jednu nebo dvě LED zapojené v sérii.

## 4 NÁVRH HARDWARE

Výběr komponent pro realizaci funkčního zapojení byl částečně dán schopnostmi daného mikrokontroléru nRF52832 a také u vysílače byl stěžejní výběr komunikačního protokolu DMX512 s přenosem dat po USB.

### 4.1 Mikrokontrolér nRF52832

Pro vývoj zařízení s nRF52832 dodává výrobce referenční zapojení dostupná v [25]. Z těchto materiálů bylo využito zapojení krystalu, bezdrátové části a všech oddělovacích kondenzátorů. Částečně bylo použito i zapojení vývojového kitu nRF52 DK s označením výrobce PCA10040. Celé zapojení je možné vidět v příloze C.2 pro vysílač a v příloze C.1 pro přijímače.

#### 4.1.1 Nahrávání a ladění programu

Tento mikrokontrolér disponuje technologií Serial Wire Debug (SWD) pro nahrávání a ladění programu a je alternativou k z pohledu počtu pinů náročnějšímu Joint Test Action Group (JTAG), jelikož pro SWD stačí k plné funkčnosti piny 2. Ve výbavě mikrokontroléru je i Embedded Trace Macrocell (ETM), který však nebyl využit pro nedostatek volných pinů.

### 4.2 Zesilovač signálu

Jelikož mikrokontrolér dosahuje pouze +4dBm výstupního výkonu a -96dBm vstupní citlivosti pro BLE, byl do obvodu rádiové části vložen Power Amplifier (PA) pro vysílání a Low Noise Amplifier (LNA) pro příjem. Tyto obě části v sobě integruje RF front end čip RFX2411N. K tomuto čipu je možné připojit dvě antény a pomocí řídicího pinu přepínat, která z antén se bude používat. Dále nabízí možnost přemostit PA, LNA nebo obě dvě části a být tak v režimu „bypass“, ve kterém má minimální spotřebu a signál pouze prochází. První dva režimy přemostění se přepínají podle toho, jestli mikrokontrolér očekává příjem dat, nebo je hodlá vysílat. Zapojení tohoto čipu do obvodu vychází z dokumentů [33] a [34].

### 4.3 Vysílač

Tato část zajišťuje komunikaci s počítačem, zpracování dat, převedení na DMX512 rámce a vyslání do jednotlivých připojených přijímačů.

### 4.3.1 Napájení

Využít USB jako zdroj energie pro chod celého vysílače je z pohledu uživatelské přívětivosti pravděpodobně nejlepší řešení. Zvláště je vhodné využít USB k napájení, když je potřeba také k přenosu dat a jeho připojení je stěžejní pro správný chod zařízení. Vysílací Deska plošných spojů (DPS) disponuje dvěma USB konektory typu B. Z obou těchto konektorů je možné napájet celé zařízení. Pro oddělení USB konektorů a zdrojů k nim připojených jsou použity diody orientované v propustném směru od každého zdroje a nemůže tak docházet k vzájemnému ovlivňování zdrojů. Problém by mohl nastat v případě, kdy zdroje by neměly společný záporný potenciál. Stínění a záporné kontakty konektorů USB jsou galvanicky spojeny. Připojení napájení do každého konektoru je signalizováno samostatnou červenou Light-Emitting Diode (LED). O snížení napětí na 3.3V se stará low-dropout (LDO) stabilizátor MCP1755S v pouzdře SOT223. Stabilizátor je zapojen podle katalogového listu výrobce se vstupní i výstupní kapacitou 1 $\mu$ F. Přítomnost stabilizovaného napětí je signalizována bílou LED.

### 4.3.2 Komunikace s počítačem

Kvůli zajištění kompatibility ovládacích programů s tímto vysílačem bylo nutné vybrat podporovaný integrovaný obvod, schopný vytvářet DMX512 signál. Pro dobrou dostupnost a univerzálnost byl vybrán čip od firmy Future Technology Devices International Limited (FTDI) a to FT232R v pouzdře QFN-32. DPS obsahuje jeden tento obvod pro každý konektor USB. Spojení tohoto čipu s USB konektorem je chráněno obvodem USBLC6-2 firmy STMicroelectronics (ST). Tento obvod zajišťuje základní ochranu proti Electrostatic Discharge (ESD) u datového i napájecího vedení. Je osazen v pouzdře SOT23-6L.

**FT232R** je převodník z USB na sériový Universal asynchronous receiver/transmitter (UART) s pokročilými funkcemi.[29] Vyhovuje specifikaci USB 2.0.

Napájení je oddělené pro USB komunikační část a pro Input/Output (IO) část. USB část se napájí přímo z konektoru 5V. IO část je napájena 3.3V z LDO stabilizátoru. Toto oddělení je nutné, protože mikrokontrolér nedokáže pracovat s 5V úrovní signálu.

Signalizace datové komunikace je znázorněna dvěma LED. Oranžová pro vysílání DMX512 a zelenou pro příjem.

**Připojení k mikrokontroléru** mají trvale oba čipy FT232R. Připojeny jsou oba směry komunikace. Výběr, z kterého čipu budou data DMX512 zpracována a dále posílána, je pomocí dual in-line package (DIP) přepínače a to konkrétně třetím

přepínacím kontaktem, který je nejbližší k USB konektorům a FT232R čipům. Volba této pozice na DIP přepínači je z důvodu snadného zapamatování funkce. Horní nebo dolní pozice přepínače odpovídá pozici vybraného čipu na DPS. Pokud by však bylo potřeba přepínací kontakt využít jiným způsobem, funkce USB konektorů se stanoví pevně.

Druhý, a zároveň prostřední, přepínací kontakt na DIP přepínači slouží k volbě, zda telemetrická data o systému v podobě UART budou posílána na druhý FT232R čip, než se používá pro DMX512 komunikaci, nebo na lištu pinů sloužící jako rozšiřující konektor. Jelikož mikrokontrolér obsahuje pouze jeden UART jako periférii a jeho přijímací část je použita pro dekódování DMX512 (více o dekódování v kapitole 5.3), musí být nastavena vysílací část se stejnými parametry jako má část přijímací:

- Rychlost: 250000 baudů/s
- Žádná parita
- Bez kontroly toku

Poslední přepínací kontakt nemá přiřazenou žádnou funkci.

## 4.4 Přijímače

Jeden nebo více přijímačů může být obslouženo jedním vysílačem. Každý z těchto přijímačů je nezávislý na ostatních a liší se od sebe pouze nastavenou adresou.

### 4.4.1 Napájení

Lithium-iontový (Li-Ion) článek velikosti 18650 je použit v baterii tří sériově spojených kusů pro napájení každého přijímače. Tato výrobní technologie a velikost článků byla zvolena pro její dobré poměry mezi kapacitou/hmotností a kapacitou-/objemem jednotlivých článků. Jednotlivé Li-Ion články jsou nezávisle vloženy v držáku na DPS s pozicí pro každý článek. Napětí každého článku je měřeno zvlášť přes rezistorový dělič napětí a přivedeno na analogově-digitální převodník (AD) mikrokontroléru. Každý AD vstup je částečně chráněn proti přepólování článku diodou v závěrném směru. Při použití Li-Ion článků NCR18650GA s kapacitou 3500mAh od výrobce Panasonic převyšuje celková kapacita 38Wh. Maximální proudový odběr z článků je 10A. To umožňuje dodávat výkon více než 100W po dobu 20 minut. Takto dimenzované napájení téměř neomezuje v množství a spotřebě připojených světelných zdrojů

Ochrana proti přepólování celé baterie je vyřešena P MOSFETem IRFHM9331 s připojeným Drain kontaktem na kladném pólu baterie, Gate na záporném pólu a Source jako výstupem. Toto zapojení je velice vhodné použít, protože se očekává odběr proudu v řádu několika ampér a jakákoliv dioda by způsobovala velké ztráty,

zahřívala se a musela by tak být dostatečně velká, aby dokázala vygenerované ztrátové teplo předat okolí.

Za tímto ochranným MOSFETem je připojen přes posuvný vypínač 3,3V LDO stabilizátor MCP1755S, stejný jako u vysílače.

Dále je také za ochranným MOSFETem zařazen ještě jeden, stejný P MOSFET, který je již ale řízený z mikrokontroléru přes malý N MOSFET. Tento slouží pro sepnutí výstupu napájení a umožňuje tak odpojit připojená zařízení například při vybití baterie.

Použité P MOSFETy mají  $R_{DSon}$  maximálně  $14,6\Omega$ . Při maximálním proudovém odběru 10A se na každém z nich ztrácí 1,76W dle výpočtu:  $P_{ztr} = R_{DSon} \times I^2$ . Při této výkonové ztrátě se tranzistor může ohřát až na teplotu  $130^\circ C$  při okolní teplotě  $40^\circ C$ . Tato maximální teplota byla vypočítána pomocí vzorce 4.1 se znalostí tepelných odporů převzatých z katalogového listu tranzistoru a stanovené okolní teploty:

- $R_{\theta JC} = 6^\circ C/W$
- $R_{\theta JA} = 45^\circ C/W$
- $T_A = 40^\circ C$

$$T_J = P_{ztr} \times (R_{\theta JC} + R_{\theta JA}) + T_A \quad (4.1)$$

$$T_J = 1,76 \times (6 + 45) + 40 = 129,76^\circ C$$

Takto vysoká teplota je sice nižší než povolená maximální teplota  $150^\circ C$ , ale byla by při ní značně namáhána DPS. V blízkém okolí těchto tranzistorů nejsou další součástky, které by této teplotě mohly být vystaveny.

## 4.4.2 Vstupy a výstupy

DIP přepínač s šesti přepínači je použit k nastavení unikátní adresy každého přijímače a díky němu je tak možné posílat každému přijímači jen jeho sadu dat a nevytěžovat tolik komunikaci.

Jako výstupní napájecí konektory jsou osazeny konektory firmy Amass s označením XT30 a jak název napovídá, jejich proudová zatížitelnost je až 30A. Jsou polarizované, tudíž zabraňují přepólování při připojování. Tyto konektory spolu s jejich většími variantami, XT60 a XT90, jsou zejména používány modeláři v jejich bateriově napájených modelech.

Pro přenos řídicích PWM signálů s informací o jasu jsou použity dva deseti pinové IDC konektory. Každý z nich přenese 8 kanálů.

### 4.4.3 Rozměry a hmotnost

Celková hmotnost včetně Li-Ion článků činí 320g. Hmotnost Li-Ion článků je dohromady přibližně 150g. Hmotnost samotné krabičky zhotovené z ořechového dřeva je 120g. Vnější rozměry krabičky jsou  $37 \times 94 \times 110\text{mm}$  ( $V \times \check{S} \times H$ ). Takto rozměrná a těžká krabička je vhodná pouze na nejnáročnější použití s požadavkem na maximální dodaný výkon. Na méně náročné použití by bylo vhodné mnohem menší a lehčí provedení, které by méně omezovalo člověka ve volném pohybu.

## 4.5 Budiče LED

Hardwarový návrh budičů staví na obvodu PT4115, který je schopný pracovat při proudu až 1,2A a napájecím napětí až 30V. Finální maximální proud je nastaven snímacím rezistorem, na kterém se budič snaží dosáhnout úbytku napětí 98mV. Výběr cívky je uvažován pro maximální proud okolo 1A. Nastavení žádané intenzity se provádí přivedením Pulse Width Modulation (PWM) signálu, nebo analogové napěťové úrovně v rozmezí 0,3V a 2,5V na „DIM“ pin budiče. Tento návrh počítá s první variantou a přidává pull-down rezistor pro vypnutí budiče, když není přítomen PWM signál. Dále návrh obsahuje ochranu proti přepětí na stmívací pinu v podobě Zenerovy diody zapojené v závěrném směru k zemi a rezistoru zapojeného sériově mezi vstup PWM a budič. Tímto zapojením vznikl dělič napětí, který při přivedení PWM signálu o amplitudě 3,3V sníží jeho úroveň na 3V. Toto napětí je stále dosti vzdálené od analogového řízení napětím (2,5V), takže funkce není ovlivněna a stále je možné dosahovat plného jasu.

Vést PWM signál a napájení ke každému budiči zvlášť by bylo značně komplikované, proto vznikly dvě varianty DPS nesoucí čtyři nebo osm těchto budičů. Byla tak ušetřena cena za propojovací kabely a konektory.

Celý návrh je vytvořen s ohledem na cenu komponent, která nepřesáhla 9Kč za kompletní budič pro jeden kanál (cena konektorů a DPS není započítána).

## 5 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ MIKROKONTROLÉRŮ

Jako vývojové prostředí bylo zvoleno „µVision 5 IDE“ firmy Keil. Toto prostředí je určené pro mikrokontroléry s jádrem ARM. V bezplatné verzi toto Integrated Development Environment (IDE) uživatele nijak neomezuje a nabízí plnou funkčnost, pokud výsledný zkompileovaný program nepřekročí velikost 32KB.

Při vytváření této práce se naprogramovaly dva nezaměnitelné programy pro mikrokontroléry. Jeden pro vysílač a druhý pro sadu přijímačů. Každý je uzpůsoben připojeným komponentám přes DPS a plní tak pouze svou funkci. Vytvoření jednoho univerzálního programu by možné bylo, ale pravděpodobně by zkompileovaná velikost programu zabrala ve FLASH paměti více než 32KB místa a IDE, v této zkušební verzi, by ho nedovolilo vytvořit.

### 5.1 Software development kit

Výrobce před připravené Software development kit (SDK) slouží jako usnadnění pro vývojáře a je v podobě driverů, knihoven a příkladů využití jednotlivých periférií. Je dodáváno v různých verzích s odlišnou podporovanou řadou produktů. V této práci je využito „nRF5 SDK v12.2.0“, která podporuje v současné době všechny řady produktů s tím, že nejnovější mikrokontrolér nRF52840 má pouze experimentální podporu.

Novější, v práci nepoužité, „nRF5 SDK v13.0.0“ ztrácí podporu produktů starší řady nRF51 a podpora čipu nRF52840 je stále experimentální. Přináší navíc ale podporu Bluetooth 5 s novou experimentální verzí SoftDevice „S140 SoftDevice v5.0.0-2.alpha“. Více o SoftDevice je pojednáno v kapitole 5.4.5.

### 5.2 Periferie mikrokontroléru

V této kapitole jsou popsány pro požadovanou funkci stěžejní periferie mikrokontroléru, způsob, kterým jsou využity, a k čemu slouží při fungování zařízení. Periferie, které zde popsány nejsou, mohou přesto být využívány jinou periferií nebo funkcí z SDK vydaného výrobcem.

#### 5.2.1 General-purpose input/output

Nespornou výhodou tohoto mikrokontroléru je flexibilní rozložení funkcí pinů, což znamená, že každá periferie může použít kterýkoliv General-purpose input/output



(GPIO) pin pouzdra. Výjimku z tohoto pravidla tvoří AD převodník, který má vstupy na svých pinech fixně. Každý pin však může mít přiřazenou funkci pouze od jedné periferie v jeden čas. Toto flexibilní přiřazení pomohlo snadno rozmístit součástky na DPS. Pro přímou interakci s piny je využíváno driveru „nrf\_gpio.c“ z SDK a je zejména využito pro řízení stavových LED, čtení tlačítka a DIP.

### 5.2.2 PWM

Mimo běžných časovačů obsahuje mikrokontrolér i speciální moduly časovačů určené pro generování PWM signálů. Tyto PWM moduly jsou tři. Každý s až čtyřmi kanály se společnou frekvencí a jednotlivě nastavitelnou střídou. Pokročilé funkce tohoto modulu, jako jsou sekvence, nejsou využity.

Změna střídy se může bezpečně provádět při dokončení každé periody pomocí přerušení běhu programu. Toto přerušení může být pozdrženo kvůli probíhající bezdrátové komunikaci, která má vyšší prioritu. Další informace o prioritách jsou v kapitole 5.4.

Maximální hodnota tohoto PWM časovače je nastavena na konstantní maximální možnou hodnotu 32767 (0x7FFF). Toto nastavení udává maximální počet kroků změny intenzity světla. Ne všechny kroky ale mohou být využity z důvodu nasazení linearizace jasu pro lidské oko z kapitoly 5.5. Hodinový takt, přivedený do tohoto modulu, je nastaven na frekvenci 4MHz. Výsledná frekvence stmívání je  $\frac{4 \times 10^6}{32767} \approx 122\text{Hz}$ . Pokud by tato frekvence stmívání způsobovala viditelné blikání například na kamerách, bylo by vhodné zvýšit taktovací frekvenci na 8MHz a docílit tak stmívací frekvence 244Hz.

Bohužel použité budiče LED nedokáží využít takového rozlišení intenzit. Pokud budiče spínají při frekvenci 400kHz, tak reálný počet kroků intenzit je při frekvenci 122Hz:  $\frac{400 \times 10^3}{122} \approx 3278$  kroků. Při nastavení dvojnásobné frekvence 244Hz by počet intenzit ještě více klesl na hodnotu pouze  $\approx 1640$  kroků.

Nasazení 15bit stmívání, když reálně se využívá ani ne 12bit, je myšleno pro další rozšíření o kvalitnější budiče s jiným principem stmívání.

### 5.2.3 Časovače

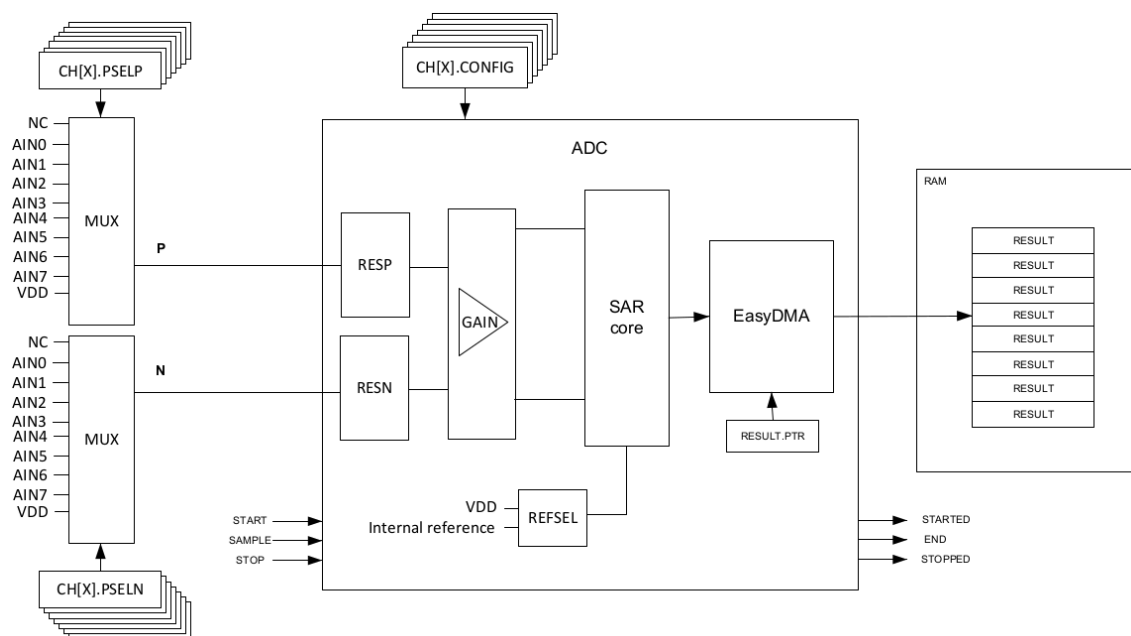
Jelikož je zapotřebí zajistit až 16 PWM výstupů a speciální časovače pro tuto funkci jsou schopné zajistit maximálně 12 výstupů, je nutné využít i univerzální časovače pro obsluhu zbývajících. Jelikož pro tuto práci není potřeba všech 16 PWM výstupů, jsou zbývajících 4 piny rezervovány pro další funkcionalitu a rozšíření třeba o Two Wire Interface (i2c) nebo Serial Peripheral Interface (SPI) komunikační rozhraní.

### 5.2.4 AD převodník

Měření napětí je využito pouze pro měření napětí na baterii v přijímači. Mikrokontrolér v sobě integruje diferenciální AD převodník využívající Successive Approximation Register (SAR) a je označen jako Successive approximation analog-to-digital converter (SAADC). Jeho rozlišení je až 12bit. K dispozici je i integrovaný zesilovač s rozsahem zesílení  $\frac{1}{6}$  až 4 násobek.

Převodník je nastaven pro neustálý převod s dobou vzorkování 40 $\mu$ s. Zesilovač je nastaven na zesílení  $\frac{1}{6}$  jelikož AD převodník vztahuje svůj digitální výstup k referenčnímu napětí o hodnotě 0.6V a maximální napětí přivedené na vstupní piny může být téměř 3.3V.

Po dokončení převodu napětí je vždy vyvoláno přerušení a data jsou dále zpracovávána.



Obr. 5.1: AD převodník v mikrokontroléru; [25]

### 5.2.5 UART

Sériové rozhraní UART je využito jak pro dekodování DMX512, které je popsáno v následující kapitole 5.3, tak i zasílání telemetrických dat o stavu zařízení.

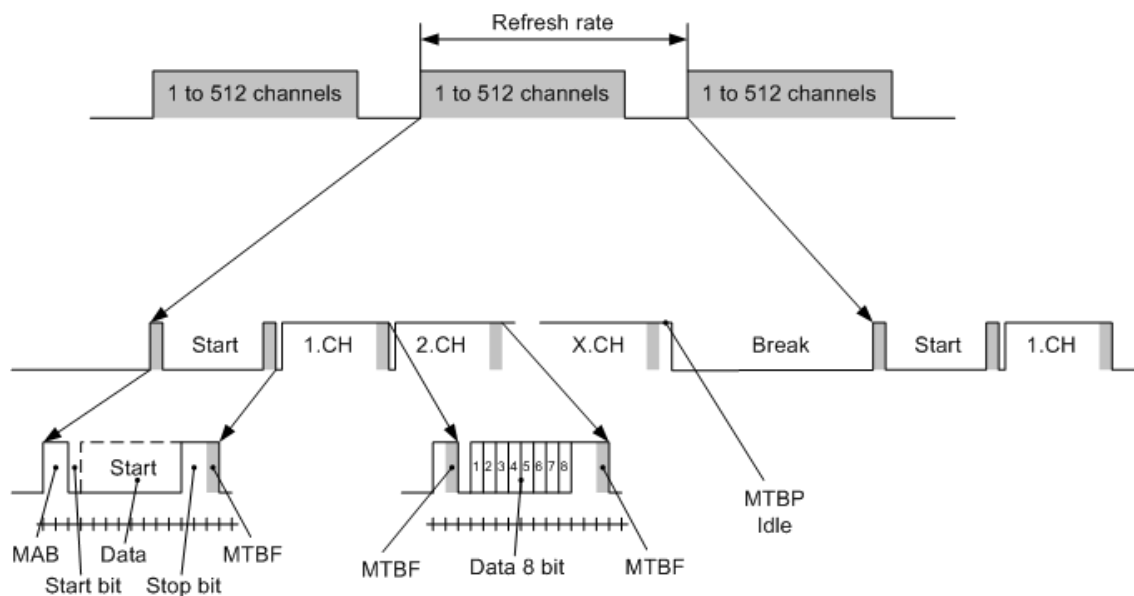
Popis	Min	Typ	Max	Jednotky
Délka bitu		4		$\mu\text{s}$
Délka rámce		44		$\mu\text{s}$
Break	88	88	1000000	$\mu\text{s}$
Mark after break (MAB)		8		$\mu\text{s}$
Mark Time Before Frame (MTBF)	0		1000000	$\mu\text{s}$
Mark Time Before Packet (MTBP)	0		1000000	$\mu\text{s}$

Tab. 5.1: Časování DMX512 dat

## 5.3 DMX512 dekodér

Pro dekódování se dá s výhodou použít vhodně nastavená UART periferie. Rychlost je třeba nastavit na 250000baudů/s. DMX512 využívá stejných značek jako standardní UART a upravuje zejména jejich trvání a místo použití dle tabulky 5.1.

### 5.3.1 Podoba dat a časování



Obr. 5.2: Podoba DMX512 dat; Zdroj: <[https://www.freestylersupport.com/wiki/dmx\\_basics:dmx\\_timing](https://www.freestylersupport.com/wiki/dmx_basics:dmx_timing)>

Přenos je zahájen odvysíláním značky MAB. Po ní následuje odvysílání start bitu jako „0“ a jednoho bytu určující typ komunikace. Čistému DMX512, bez žádných rozšíření, náleží číslo 0x00. Následují dva STOP bity odvysílané jako „1“. po této

úvodní sekvenci následují již datové rámce s jednotlivými kanály. Každý rámec je uvozen značkou MTBF, začíná start bitem a je zakončen dvěma STOP bity. Po odvysílání všech 512 rámců je vyslána značka MTBP. Po ní následuje Break stav dlouhý minimálně jako dva datové rámce. Tímto stavem je jednoznačně ukončen paket a může se očekávat další paket po odeznění tohoto Break stavu.

### 5.3.2 Využití UART pro dekódování

Break stav je detekován jako framing error a od této události je vždy znovu plněn buffer s přijatými datovými rámci. První z nich obsahuje informaci o typu dat a dále není využíván. Plnění bufferu probíhá bez zásahu procesoru, jelikož je využito Direct Memory Access (DMA) řadiče, který je dostupný. Po naplnění bufferu je automaticky předán buffer druhý a je vyvoláno přerušení a procesor data z prvního bufferu zpracuje. Tento děj se neustále opakuje. Délka MTBF a MTBP není nijak kontrolována.

### 5.3.3 Triple buffering

Aby se data po přijetí BREAK stavu nemusela kopírovat a vždy byl dostupný celý paket, je využito tří bufferů pro ukládání dat. Jeden, do kterého se právě zapisuje, jeden, ze kterého se právě čte (a tím i vysílá) a třetí, do kterého se bude zapisovat příště. Dokud není dostupný buffer s novějším paketem, tak se za aktuální data považuje poslední celý přijatý paket. Pokud ještě není odvysílán paket a další dva nové jsou již ve zbývajících bufferech, není příjem nových paketů pozastaven, ale začne se přepisovat starší ze dvou ještě neodvysílaných. Je tím dosaženo, že je připraven vždy nejnovější paket k odvysílání a starší, již neaktuální, je zahozen. Tohoto zahazování je možné si dovolit, jelikož data v paketech na sobě nejsou závislá a prioritu má rychlost, potažmo zpoždění, před úplností dat.

Podobné techniky se využívá u počítačové grafiky při vykreslování dat na monitor.

## 5.4 Bluetooth Low Energy v4.2

Existují dva druhy komunikace Bluetooth ve verzi 4:

- **Bluetooth classic**
- **Bluetooth Low Energy (BLE)**

Oba typy jsou navzájem nekompatibilní a ani být nemají, protože každý typ má svůj cíl. Bluetooth classic si neklade tak vysoké nároky na nízkou spotřebu, a proto dovoluje rychlejší přenosy dat. BLE se naopak snaží být maximálně energeticky

efektivní a dosahuje toho velmi krátkými časy, kdy je aktivní komunikace. Slouží převážně k výměně malého množství dat zasílaného v přesně určených časových intervalech.

Aby výrobce usnadnil vývojářům práci a významně urychlil vypuštění výrobků s jeho mikrokontrolérem na trh, dodává takzvaný SoftDevice zajišťující podporu nejrůznějších bezdrátových protokolů. Mezi těmito SoftDevice knihovnami jsou i knihovny určené pro Bluetooth. Detailněji je o SoftDevice pojednáno v kapitole 5.4.5.

### 5.4.1 Navázání spojení

Při navazování jednoduchého obvyčejného spojení mezi dvěma nebo více zařízeními se dělí BLE zařízení na: „Advertiser“ a „Scanner“.

**Advertiser** je často jednodušší zařízení. Například senzor tepu, teploty, rychlosti atd. Podle nastaveného intervalu a délky vysílání vysílá na třech pevně stanovených přenosových kanálech a jeho úkolem je dát o sobě vědět, že je připraven na spojení.

**Scanner** je naopak zařízení, které vyhledává připojitelná zařízení také v intervalech s nastavenou délkou vyhledávání.

Spojení nastane, když Scanner přijme Advertising data a dále úspěšně proběhne výměna další komunikace.

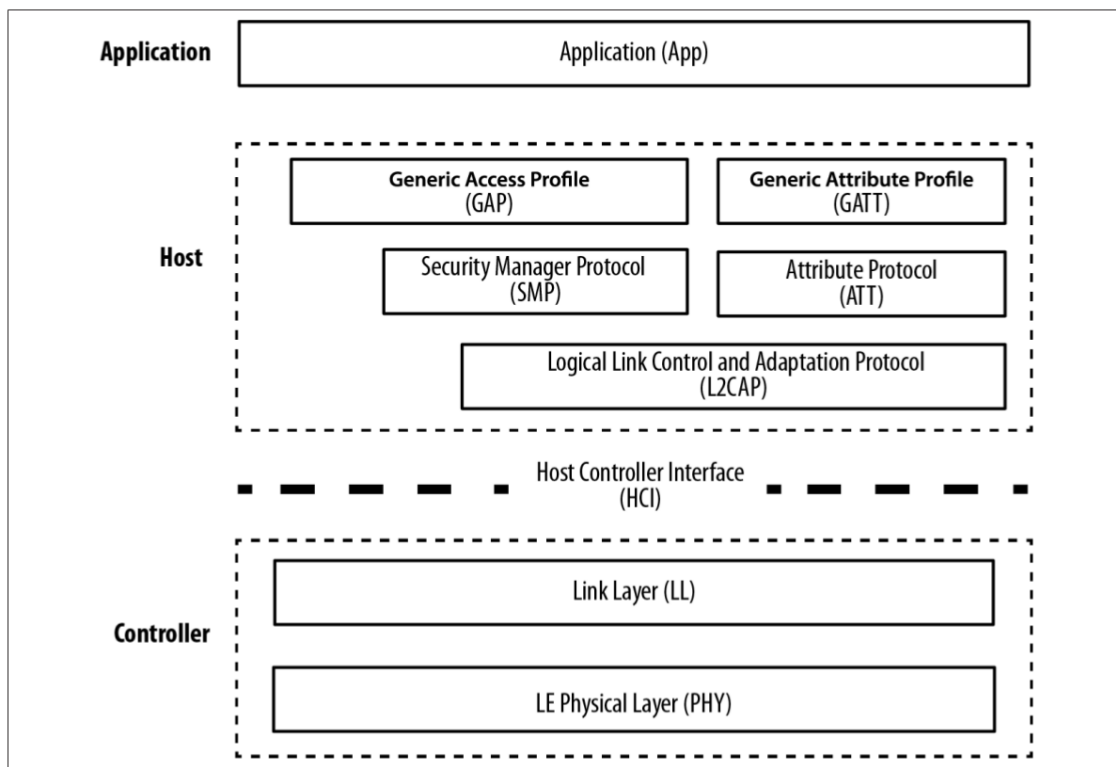
Interval spojení je nastaven u každého zařízení zvlášť a jeho velikost udává, za jakou dobu proběhne další spojení, při kterém bude možná výměna dat.

Advertiser je v této zpracovávané práci přijímač, snažící se připojit k vysílači, scanneru, a začít tak získávat informace o intenzitě svitu jednotlivých kanálů.

### 5.4.2 Vrstvy BLE

Zde jsou v krátkosti popsány jednotlivé vrstvy BLE. Více o jednotlivých a dalších nezmíněných vrstvách je možné dohledat v [24].

**Fyzická vrstva** obsahuje analogové komunikační obvody operující na frekvenci od 2.4GHz do 2.4865GHz rozdělené na 40 kanálů. Tři z těchto kanálů jsou určeny pouze pro účely Advertising.



Obr. 5.3: Jednotlivé vrstvy BLE [25]

**Linková vrstva** operuje přímo s fyzickou vrstvou a integruje v sobě části jako: Cyclic redundancy check (CRC) generátor kontrolních součtů, generátor náhodných čísel, Advanced Encryption Standard (AES) šifrování a hlavně sestavuje jednotlivé pakety.

Součástí této vrstvy je i adresa Bluetooth zařízení. 6byť dlouhé unikátní číslo. Rozlišují se dva typy této adresy: veřejná a náhodná. Veřejná musí být registrována a za životnosti zařízení se nemění. Náhodná může být generována a je toho využito u přijímačů, kde část adresy je statická a poslední byte je načten z DIP přepínače.

**Attribute Protocol (ATT)** vytváří atributy s daty poskytovanými serverem s unikátním identifikátorem označovaným „handle“ a unikátním identifikátorem typu atributu „UUID“. Každý atribut má nastavena oprávnění operace s ním.

**Generic Attribute Profile (GATT)** vytváří abstraktní vrstvu zahrnující hierarchii dat. Zavádí služby seskupující charakteristiky. Charakteristiky zase obsahují jednotlivé další atributy.

**Generic Access Profile (GAP)** řeší, jak spolu zařízení pracují ve smyslu prohledávání, spojování a navazování zabezpečeného spojení.

### 5.4.3 Zavedené služby a charakteristiky

Bluetooth SIG zavádí standardizované služby a charakteristiky se speciálním zkráceným UUID. Mezi těmito však nebyla nalezena vhodná služba poskytující charakteristiky nesoucí informaci o intenzitě osvětlení a ani služba informující o napětí na jednotlivých člancích baterie. To však nebylo překážkou a byly definovány dvě nové služby a čtyři charakteristiky.

Služba sloužící pro přenos dat zastřešuje dvě charakteristiky. Jedna, s informací o intenzitě svitu jednoho kanálu, je použita šestnáctkrát. Jednou pro každý kanál. Druhá charakteristika je zastoupena dvakrát a seskupuje první nebo druhou osmici kanálů a jejím použitím se šetří množství přenášených dat spojených s režii přenosu. To je vhodné použít, když se mění více kanálů současně a nedochází tak ke zpoždování nebo přeskokování dat.

Druhá zavedená služba obsahuje jednu charakteristiku s napětím celé baterie a druhou charakteristiku použitou třikrát s napětím jednotlivých článků baterie.

### 5.4.4 Komunikace

Každý připojený přijímač periodicky v nastaveném intervalu navazuje spojení s vysílačem a pokud jsou k odeslání data určená jemu, zahájí se přenos.

### 5.4.5 SoftDevice

Jsou to knihovny bezdrátových protokolů pro využití v System on Chip (SoC) řešení.[28] Jsou vytvořeny speciálně pro mikrokontroléry výrobce a každý podporuje jen jisté protokoly. Získávají se v podobě předkompilovaných binárních souborů a interakce s nimi se provádí pomocí Application Programming Interface (API) deklarovaného v hlavičkových souborech programovacího jazyka C, ve kterém je celý program pro mikrokontroléry vytvářen.

V současné době jsou k dispozici tyto typy SoftDevice:

- **S132 SoftDevice**  
BLE protokol v podobě centrálního, periferního, nebo kombinovaného fungování.[28]
- **S140 SoftDevice**  
Rozšiřuje S132 o podporu BLE 5
- **S212 SoftDevice**  
ANT protokol a API pro nRF52832 mikrokontrolér
- **S332 SoftDevice**  
Je kombinací BLE s ANT a umožňuje jejich současné nasazení a fungování

## Využití

Vytvořený program do mikrokontrolérů využívá první zmíněný SoftDevice S132. Dodaný binární soubor je samostatně nahrán do FLASH paměti, kde zabírá 128KB z 512KB celkových. Hlavičkové soubory, jež jsou součástí SDK, jsou vloženy do programu.

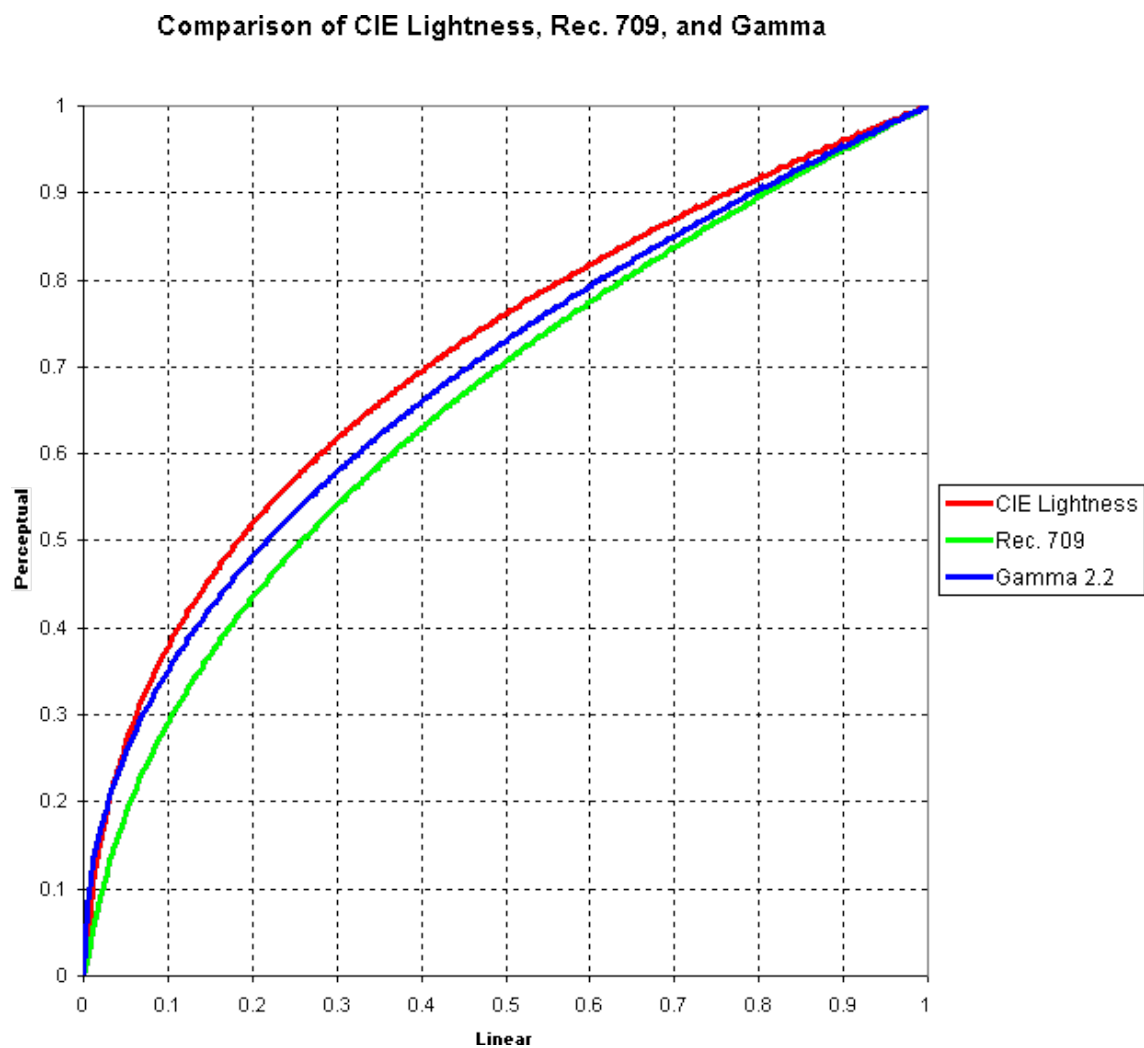
## 5.5 Linearizace jasů LED pro lidské oko

Lidské oko nevnímá lineárně rostoucí intenzitu svitu LED lineárně. Při stmívání pomocí PWM je intenzita měněna téměř dokonale lineárně. Bohužel takto tuto intenzitu nevyhodnotí oko. Proto je nutné využít převodní funkci, aby se docílilo oklamání oka. Grafické znázornění této funkce je vidět na obrázku 5.4 jako červená křivka. Další podobné křivky jsou uvedeny pouze pro porovnání a k tomuto použití nejsou určeny. Výpočet této funkce je uveden jako vzorec 5.1 převzatý ze zdroje [22].

Díky přítomnosti Floating-point unit (FPU) v mikroprocesoru je možné provádět tyto výpočty dostatečně rychle přímo v něm a není nutné používat předem vygenerovanou náhledovou tabulku, která by pro 32768 úrovní intenzity zabrala 64KB FLASH paměti.

$$\begin{aligned} L^* &\in < 0, 100 > \\ Y &= (L^*/903.3) \quad \Rightarrow L^* \leq 8 \\ Y &= ((L^* + 16)/116)^3 \quad \Rightarrow L^* > 8 \end{aligned} \tag{5.1}$$





Obr. 5.4: CIE1931 převodní křivka; Zdroj: <[http://photonstophotos.net/GeneralTopics/Exposure/Psychometric\\_Lightness\\_and\\_Gamma.htm](http://photonstophotos.net/GeneralTopics/Exposure/Psychometric_Lightness_and_Gamma.htm)>

## 6 VÝROBA, OŽIVENÍ A TESTOVÁNÍ

### 6.1 Výroba a oživení hardwaru

Podklady pro výrobu DPS byly vygenerovány z návrhového systému plošných spojů Eagle firmy Autodesk v podobě gerber souborů. Pro snížení nákladů byla výroba DPS zadána firmě NOA Labs Ltd. Objednávka byla vyřízena úspěšně a veškeré DPS byly doručeny bez chyb a defektů. Osazení součástek bylo provedeno ve školní laboratoři a bylo při něm využito ručního dispenzeru pájecí pasty pod mikroskopem. Zapájení se uskutečnilo přetavením v průběžné přetavovací peci s pásovým dopravníkem.

Testování návrhu DPS vysílače probíhalo ve dvou krocích. V prvním kroku byly osazeny pouze komponenty připojené přímo k USB portům, LDO stabilizátor napětí a čipy FT232R. Následně byla otestována komunikace s počítačem a byly proměřeny úrovně všech signálů. Tímto krokem bylo odhaleno špatné zapájení keramického kondenzátoru u stabilizátoru napětí, jelikož výstupní napětí bylo přibližně 4V místo žádaných 3,3V. Od této chvíle byla prováděna pečlivěji vizuální kontrola zapájení všech součástek a zejména všech stabilizátorů. Další problémy nebyly zpozorovány a přistoupilo se k dodatečnému doosazení zbývajících součástek. Na celém zapojení vysílače nebyly shledány žádné problémy.

Návrh DPS přijímače, na rozdíl od vysílače, obsahoval několik chybně zapojených rezistorů. První ze špatně zapojených je rezistor u spínacího P MOSFETu mezi Gate a Drain. Jeho správné zapojení je mezi Gate a Source, kde po uvolnění spínacího signálu z Gate uzavře MOSFET.

Druhý, špatně umístěný rezistor, se nacházel u spínacího N MOSFET, kde ve výchozím stavu bez signálu tento tranzistor otevíral, místo aby ho udržel zavřený.

Ve snaze minimalizovat spotřebu ve vypnutém stavu bylo navrženo odepnutí záporného potenciálu od děličů napětí z baterií. Tím by však došlo k přímému připojení napětí z baterie na AD vstupy mikrokontroléru ve vypnutém stavu. Tomuto bylo zabráněno přímým propojením spodních rezistorů děličů na záporný potenciál. V tomto stavu teče přes děliče proud 316 $\mu$ A, 632 $\mu$ A a 947 $\mu$ A při plném nabití Li-Ion článků. Dochází tak k tomu, že se první článek vybíjí třikrát rychleji než poslední.

### 6.2 Impedanční přizpůsobení vysílací antény

Impedanční přizpůsobení bylo provedeno pomocí obvodového analyzátoru Keysight E5071C. Při měření byly využity poznatky zejména z [35]. Změřený činitel odrazu je znázorněn na obrázku v příloze B.2. Při závěrečném testování získaných vlastností

bylo vyzkoušena vzdálenost mezi vysílačem a přijímači a rychlost znovunavázání spojení.

## 6.3 Dosah vysílače

Tento test byl proveden s vysílačem opatřeným všesměrovou anténou se ziskem 2dBi. Testovalo se na téměř rovném úseku silnice v zástavbě rodinných domů. Vysílač s anténou byly umístěny na zděné zídce s plechovým krytím, které mohlo částečně ovlivnit kvalitu signálu. I na konci úseku s přímou viditelností ve vzdálenosti 360m bylo spojení stabilní a bez výpadků. Pokud se však přijímač v této vzdálenosti dostal do zákrytu byť jen od keře nebo stromu, spojení začalo vypadávat a bylo nepoužitelné. Úsek, na kterém se testovalo, je možné zobrazit online na odkazu: <https://mapy.cz/s/1HQEP>

Pro navýšení dosahu nebo zajištění větší stability, by na podobně velkou vzdálenost byla vhodnější směrově vyzařující anténa.

## 6.4 Rychlost navázání spojení

Jelikož vysílač i přijímač se snaží navazovat nová spojení pouze v předem nastavených intervalech, není možné přesně určit dobu navazování spojení. Pokud se spojení snaží navázat více přijímačů, je tato doba ovlivněna i ostatními přijímači.

Pokud je zapnuto osm přijímačů (maximální možný počet) a vysílač je vypnut, tak po jeho zapnutí je všech osm přijímačů připojeno vždy do 4s.

Pokud se připojuje pouze jeden přijímač, tak doba do připojení je maximálně 1s.

## ZÁVĚR

Po získání přehledu o komunikačních standardech v jevištní osvětlovací technice a vybrání protokolu DMX512 byla veškerá další návrhová práce vztažena právě k tomuto výběru. Po zadání výroby DPS byl zahájen vývoj programů na vývojovém kitu výrobce mikrokontroléru. Po následném osazení DPS a opravě chyb v návrhu (popsaných v kapitole 6.1), pokračoval vývoj programů již na finálních zařízeních. Výsledek této práce byl úspěšně použit při vystoupení scénického tance v divadle (obr. C.4).

# LITERATURA

- [1] SHELLEY, Steven. *A Practical Guide to Stage Lighting*. 2. vydání. Boston: Elsevier/Focal Press, 2011. ISBN 9780240811413.
- [2] DUNHAM, Richard. *Stage lighting: fundamentals and applications*. Boston: Allyn & Bacon, 2011. ISBN 9780205461004.
- [3] BELLMAN, Wilard F. *LIGHTING THE STAGE: Art and Practice*. 3. vydání Louisville (USA, KY): Broadway Press, 2001. ISBN 0-911747-40-0.
- [4] Lighting Control Developments. *TheatreCrafts.com* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<http://www.theatreCrafts.com/page.php?id=810>>.
- [5] USITT DMX512, DMX512/1990, DMX512-A *United States Institute for Theatre Technology (USITT)* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<http://old.usitt.org/DMX512.aspx>>.
- [6] PLASA North America. *ANSI E1.11 - 2008 (R2013)* [online]. CP/2007-1013r3.1. 2013 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-11\\_2008R2013.pdf](http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-11_2008R2013.pdf)>.
- [7] PLASA North America. *ANSI E1.27-1 - 2006 (R2016)* [online]. CP/2003-1028r5.2 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-27-1\\_2006R2016.pdf](http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-27-1_2006R2016.pdf)>.
- [8] PLASA North America. *ANSI E1.27-2 - 2009 (R2014)* [online]. CP/2006-1011r5.1a 2013 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-27-2\\_2009\\_R2014.pdf](http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-27-2_2009_R2014.pdf)>.
- [9] PLASA North America. *ANSI E1.20 - 2010* [online]. CP/2009-1017r2 2011 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/ANSI\\_E1-20\\_2010.pdf](http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/ANSI_E1-20_2010.pdf)>.
- [10] PLASA North America. *ANSI E1.17 - 2015* [online]. CP/2011-1007 2015 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/ANSI\\_E1-17\\_2015\\_ACN\\_Secured.zip](http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/ANSI_E1-17_2015_ACN_Secured.zip)>.
- [11] PLASA North America. *ANSI E1.31 - 2016* [online]. CP/2014-1009r1 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<http://tsp.esta.org/tsp/documents/docs/E1-31-2016.pdf>>.
- [12] BSR E1.33 *RDMProtocol* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<http://www.rdmprotocol.org/whats-next/rdmnet-e1-33/>>.

- [13] sACN *Artistics Licence Integration* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://artisticlicenceintegration.com/?page\\_id=2600](http://artisticlicenceintegration.com/?page_id=2600)>.
- [14] ART-Net *Artistics Licence Integration* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://artisticlicenceintegration.com/?page\\_id=977](http://artisticlicenceintegration.com/?page_id=977)>.
- [15] Artistics Licence *Art-Net 4* [online]. 1.4db 20/9/2016 2016 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<http://www.artisticlicence.com/WebSiteMaster/User%20Guides/art-net.pdf>>.
- [16] FAILS, Gary. *What You Need To Know About Wireless DMX* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[http://www.citytheatrical.com/docs/default-source/pdfs/what\\_you\\_need\\_to\\_know\\_about\\_wireless\\_dmx.pdf](http://www.citytheatrical.com/docs/default-source/pdfs/what_you_need_to_know_about_wireless_dmx.pdf)>.
- [17] NEWTON, Simon. *Open Lighting Project* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<https://docs.google.com/presentation/d/1LaopApSt0Z7z6PVYvjrQiybki39CovWNR-V9BDJNeu0/present?slide=id.i56>>.
- [18] ANT Tech FAQ. *thisisant.com* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<https://www.thisisant.com/developer/resources/tech-faq/category/10/>>.
- [19] RS 485 & 422. *vyvoj.hw.cz* [online]. [b.r.] [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/rs-485-422.html>>.
- [20] Dimmer. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Dimmer>>.
- [21] Light-emitting diode. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <[https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting\\_diode](https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode)>.
- [22] Psychometric Lightness and Gamma. *Photons to Photos* [online]. 1. června 2017 [Prepared 2005-03-26]. Dostupné z: <[http://photonstophotos.net/GeneralTopics/Exposure/Psychometric\\_Lightness\\_and\\_Gamma.htm](http://photonstophotos.net/GeneralTopics/Exposure/Psychometric_Lightness_and_Gamma.htm)>.
- [23] TOWNSEND, Kevin., Robert. DAVIDSON, AKIBA. a Carles. CUFÍ. *Getting started with Bluetooth low energy: tools and techniques for low-power networking*. Revised First Edition. O'Reilly Media, 2014. 180 s. ISBN 978-1-4919-4951-1.

- [24] Bluetooth Core Specification. *bluetooth.com* [online]. [b.r.] [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <[https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc\\_id=286439](https://www.bluetooth.org/DocMan/handlers/DownloadDoc.ashx?doc_id=286439)>.
- [25] Nordic Semiconductor. *nRF52832 Product Specification* [online]. v1.3 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <[http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832\\_PS\\_v1.3.pdf](http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832_PS_v1.3.pdf)>.
- [26] Nordic Semiconductor. *nRF5 SDK v12.2.0* [software]. v12.2.0 [přístup. 2017-05-31]. Dostupné z: <[https://developer.nordicsemi.com/nRF5\\_SDK/nRF5\\_SDK\\_v12.x.x/nRF5\\_SDK\\_12.2.0\\_f012efa.zip](https://developer.nordicsemi.com/nRF5_SDK/nRF5_SDK_v12.x.x/nRF5_SDK_12.2.0_f012efa.zip)>.
- [27] Nordic Semiconductor. *S132 nRF52 SoftDevice* [software]. v3.1.0 [přístup. 2017-05-31]. Dostupné z: <<https://www.nordicsemi.com/eng/nordic/Products/nRF52832/S132-SD-v3/56261>>.
- [28] Nordic Semiconductor. *SoftDevice Specification S132* [online]. v4.1 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <[http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/S132\\_SDS\\_v4.1.pdf](http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/S132_SDS_v4.1.pdf)>.
- [29] FTDI Chip. *FT232R USB UART IC* [online]. Version 2.13 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <[http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)>.
- [30] STMicroelectronics. *Very low capacitance ESD protection - USBLC6-2* [online]. Rev 5 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <<http://www.st.com/resource/en/datasheet/usblc6-2.pdf>>.
- [31] Infineon Technologies. *HEXFET®Power MOSFET IRFHM9331PbF* [online]. December 16, 2013 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <<http://www.infineon.com/dgdl/irfhm9331pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356237f7e1f59>>.
- [32] Microchip. *300 mA, 16V, High-Performance LDO - MCP1755/1755S* [online]. Revision A (December 2012) [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25160A.pdf>>.
- [33] SKYWORKS. *2.4 GHz TX / RX Booster With Diversity Switch for IoT / BLE / ZigBee RFX2411N* [online]. Rev2.1 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <[http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/RFX2411N\\_204380A.pdf](http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/RFX2411N_204380A.pdf)>.

- [34] RFXaxis. *Range Extension for Nordic nRF51 Series with RFXaxis RFX2411N RFeIC<sup>TM</sup>* [online]. Revised December 2015 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <<https://devzone.nordicsemi.com/attachment/588240c82d2fe7119e5e4ddfc09bcf7>>.
- [35] Nordic Semiconductor. *Antenna tuning nWP-017* [online]. v1.0 [cit. 2017-05-31]. Dostupné z: <[http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nwp\\_017.pdf](http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nwp_017.pdf)>.



## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

<b>ESB</b>	Enhanced ShockBurst™
<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>ACN</b>	Architecture for Control Networks
<b>sACN</b>	Streaming ACN
<b>RDM</b>	Remote Device Management
<b>RDMnet</b>	Remote Device Management network
<b>TCP/IP</b>	Transmission control protocol / Internet protocol
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>LED</b>	Light-Emitting Diode
<b>IGBT</b>	Insulated Gate Bipolar Transistor
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>SoC</b>	System on Chip
<b>SWD</b>	Serial Wire Debug
<b>ETM</b>	Embedded Trace Macrocell
<b>JTAG</b>	Joint Test Action Group
<b>PA</b>	Power Amplifier
<b>LNA</b>	Low Noise Amplifier
<b>DPS</b>	Deska plošných spojů
<b>LDO</b>	low-dropout
<b>FTDI</b>	Future Technology Devices International Limited
<b>ST</b>	STMicroelectronics
<b>ESD</b>	Electrostatic Discharge
<b>UART</b>	Universal asynchronous receiver/transmitter
<b>IO</b>	Input/Output

<b>DIP</b>	dual in-line package
<b>Li-Ion</b>	Lithium-iontový
<b>AD</b>	analogově-digitální převodník
<b>SAADC</b>	Successive approximation analog-to-digital converter
<b>SAR</b>	Successive Approximation Register
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>SDK</b>	Software development kit
<b>GPIO</b>	General-purpose input/output
<b>MAB</b>	Mark after break
<b>MTBF</b>	Mark Time Before Frame
<b>MTBP</b>	Mark Time Before Packet
<b>DMA</b>	Direct Memory Access
<b>FPU</b>	Floating-point unit
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>CRC</b>	Cyclic redundancy check
<b>ATT</b>	Attribute Protocol
<b>GATT</b>	Generic Attribute Profile
<b>GAP</b>	Generic Access Profile
<b>i2c</b>	Two Wire Interface
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>ST</b>	STMicroelectronics
<b>ST</b>	STMicroelectronics
<b>ST</b>	STMicroelectronics

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Protokoly</b>	<b>47</b>
A.1	DMX512-A . . . . .	47
A.2	RDM . . . . .	47
A.3	ACN . . . . .	48
A.4	ART-Net . . . . .	48
<b>B</b>	<b>Hardware</b>	<b>49</b>
B.1	Schémata . . . . .	49
B.2	Impedanční přizpůsobení antény . . . . .	52
<b>C</b>	<b>Fotodokumentace</b>	<b>53</b>

# A PROTOKOLY

## A.1 DMX512-A

**Topologie:** DMX512 kontrolér je připojen pouze k prvnímu slave zařízení. Další zařízení jsou vždy připojena k předchozímu slave zařízení a jsou tak řetězena za sebe. Kontrolér je zpravidla opatřen pouze výstupním konektorem. Slave zařízení disponují zpravidla jak vstupním tak výstupním konektorem

**Fyzická vrstva:** Data jsou vysílána po diferenciálním páru vodičů podle EIA-485[19].

- Log. 1 je menší než  $\pm 200$  mV
- Log. 0 je větší než  $\pm 200$  mV a menší než 6 V.
- Maximální napětí na vedení je 12 V
- Maximální délka vedení je 1200 m
- Maximální počet připojených zařízení na jedno vedení je 32. Pokud je potřeba připojit více zařízení, je nutné zařadit aktivní dělič vedení.
- Impedance vedení má být  $120\ \Omega$  a má být zakončeno z obou stran  $120\ \Omega$  rezistorem.

**Konektory:** DMX512 povoluje využití pouze konektoru XLR-5 a výslovně zakazuje konektor XLR-3, který by počtem pinů dostačoval, ale je primárně využíván v audiotechnice pro přenos zvuku a byla by možná velice snadná záměna těchto konektorů. XLR-5 zásuvka je využita pro výstup a XLR-5 vidlice pro vstup řídicího signálu.

DMX512-A přidává do standardu konektor RJ-45, též známý pod označením 8P8C, který je vhodný pro stále instalace, kde se často nemění zapojení zařízení.

**Kabely:** Specifika na kabely a celé vedení signálu se dělí pro přenosné[7] a stálé instalace[8].

**Protokol:** Asynchronní simplex sériový protokol. 1 start bit + 8 data bitů + 2 stop bity

## A.2 RDM

**Fyzická vrstva:** Je shodná s DMX512-A

**Protokol:** Asynchronní half-duplex sériový protokol umožňující obousměrnou komunikaci. Rozšiřuje funkce DMX512 o možnost zpětné komunikace

## A.3 ACN

**Topologie:** Je typu „star“ neboli do hvězdy

**Fyzická vrstva:** Je shodná jako pro ethernet

**Protokol:** Skládá se z více protokolů:

- Service Location Protocol (SLP) – Zjištění připojení zařízení
- Device Management Protocol (DMP) – Informace o připojeném zařízení
- Device Description Protocol (DDL) – pro čtení a zápis atributů zařízení

Využívá se UDP paketů z TCP/IP pro přenos dat - není zaručeno, že data dorazí v pořádku, neboť se nekontroluje, zda dorazí, a proto při případné ztrátě nedojde k jejich opětovnému vyslání.

## A.4 ART-Net

**Art-Net I:** Původní řešení z roku 2002. Využívá broadcast packety a maximální počet universe je omezen na 40. Není vhodný pro WiFi přenos.

**Art-Net II:** Využívá unicast packety a dokáže adresovat až 256 universe

**Art-Net III - 2011:** Dokáže adresovat až 32768 universe, ale je omezen datovou propustností použitého ethernetu

**Art-Net 4:** Rozšiřuje Art-Net III

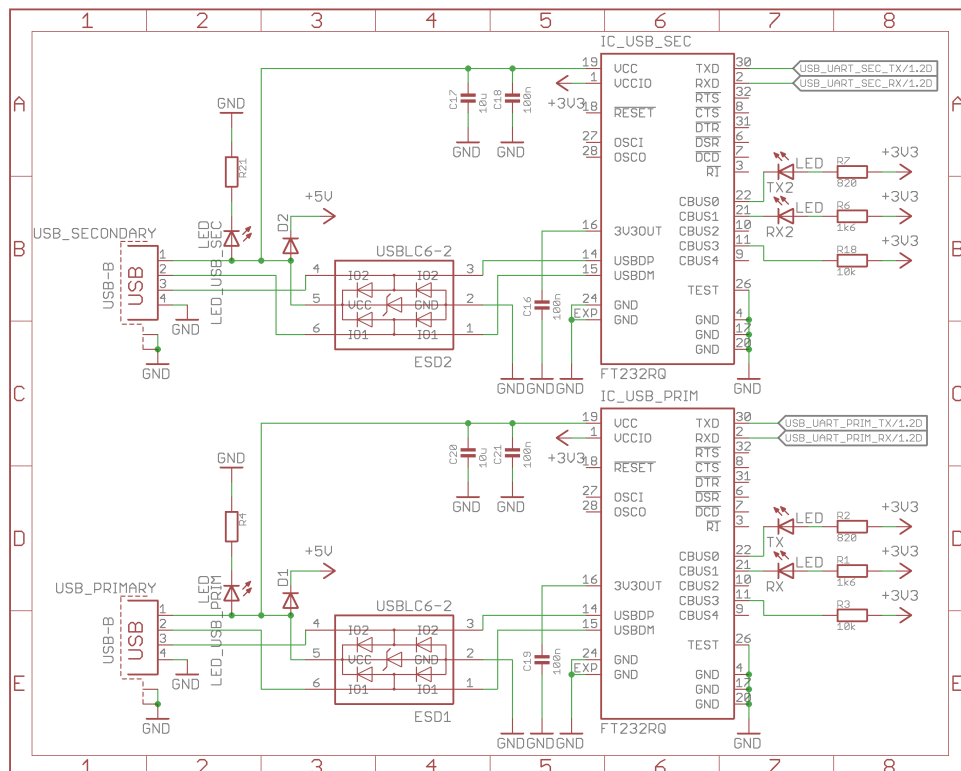
**Topologie:** Je typu „star“ neboli do hvězdy

**Fyzická vrstva:** Je shodná jako pro ethernet

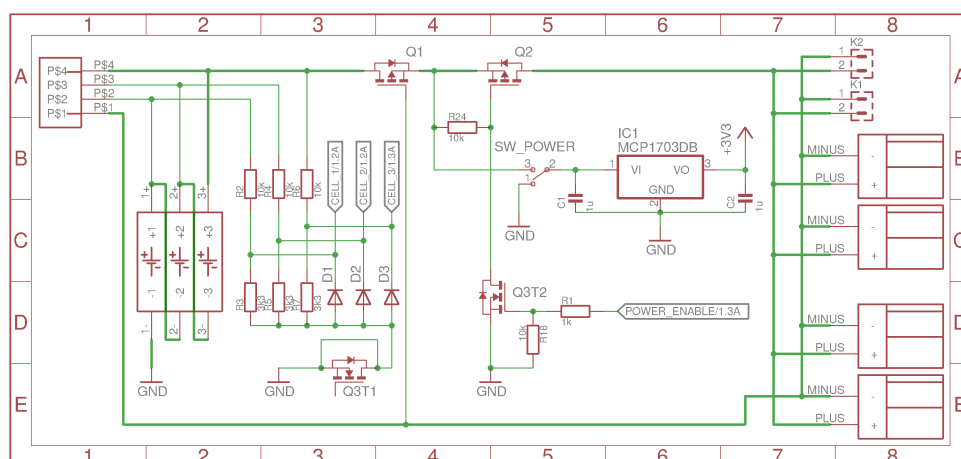
**Protokol:** Protokol je vystavěn nad TCP/IP protokolem

## B HARDWARE

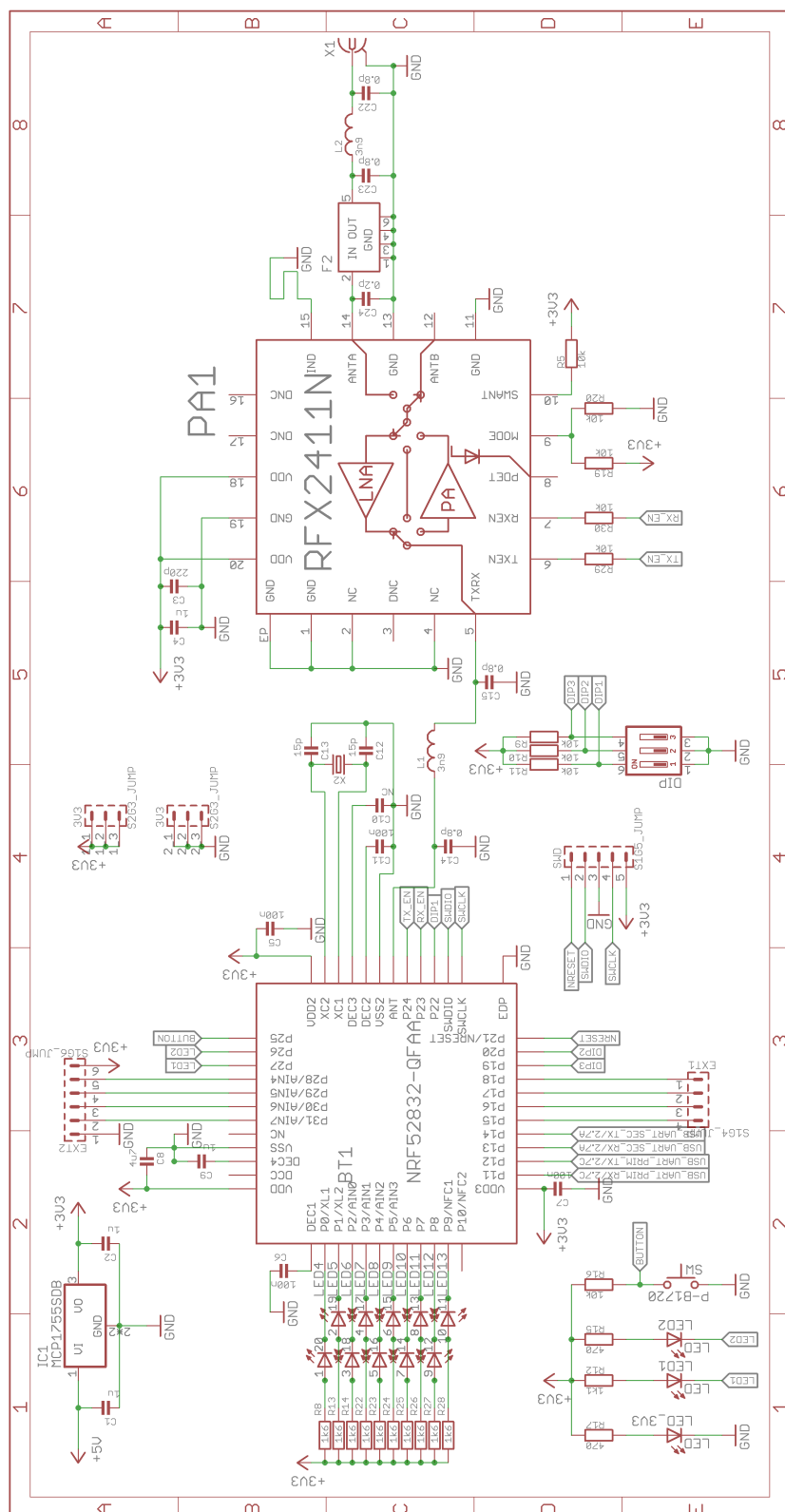
### B.1 Schémata



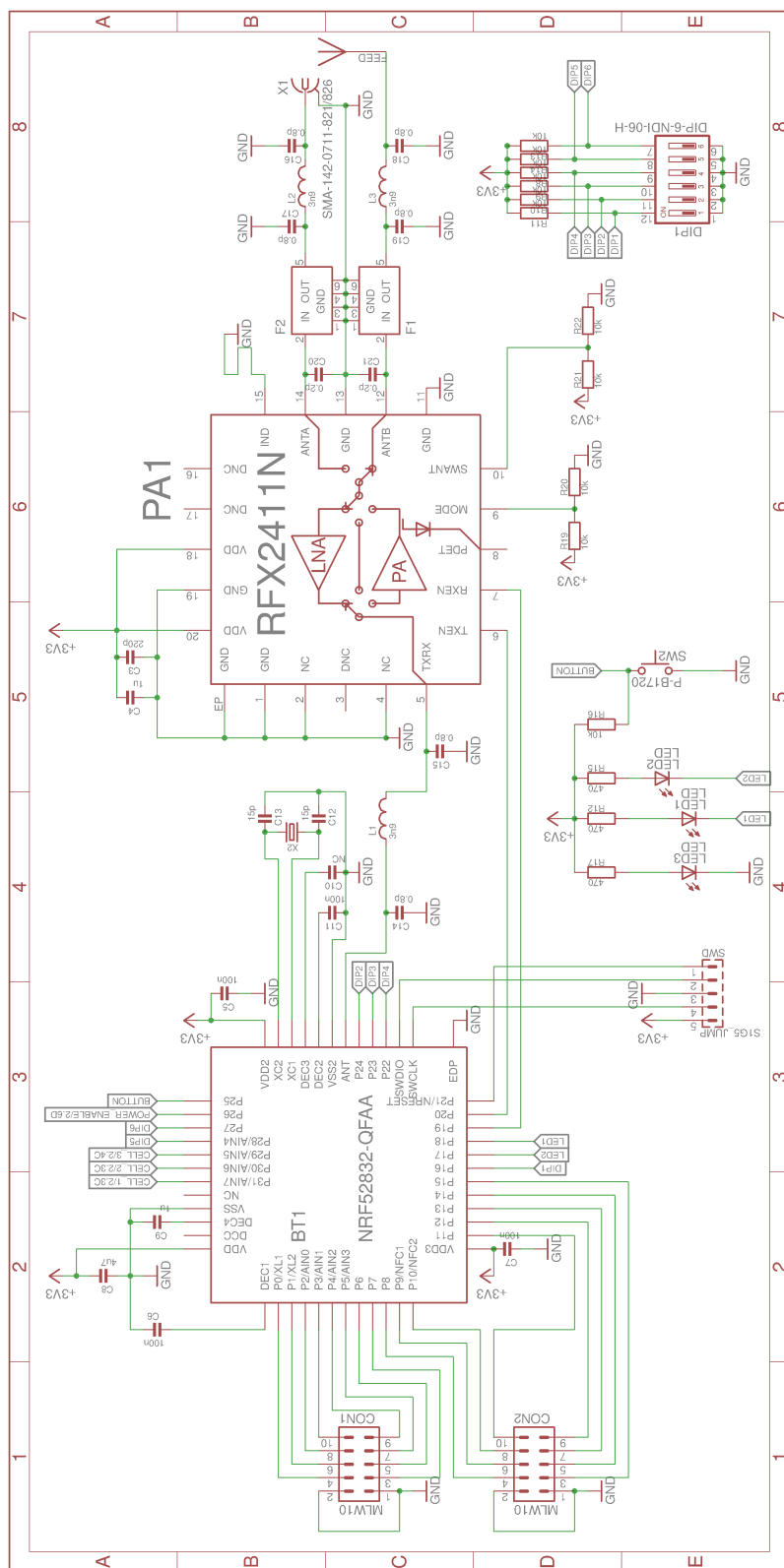
Obr. B.1: USB část vysílače



Obr. B.2: Napájecí část přijímače



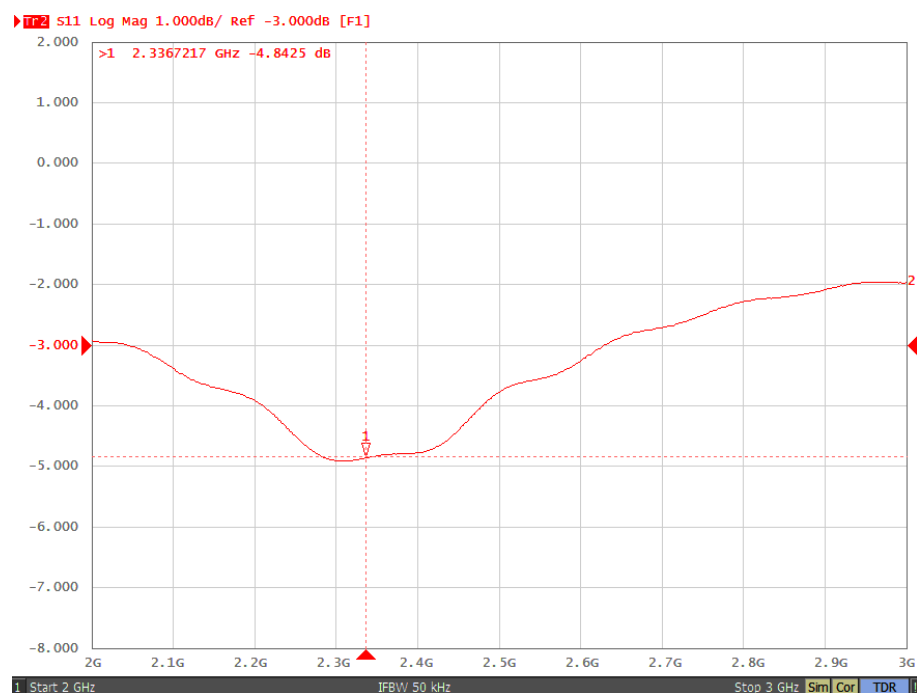
Obr. B.3: Hlavní část vysílače



Obr. B.4: Hlavní část přijímače

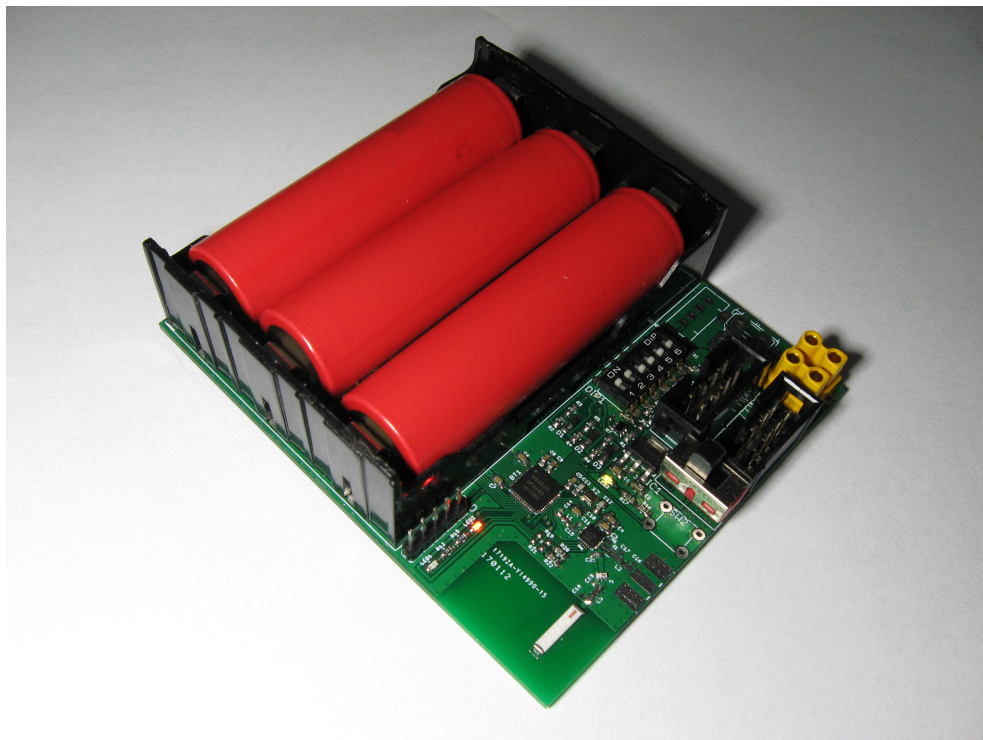


## B.2 Impedanční přizpůsobení antény

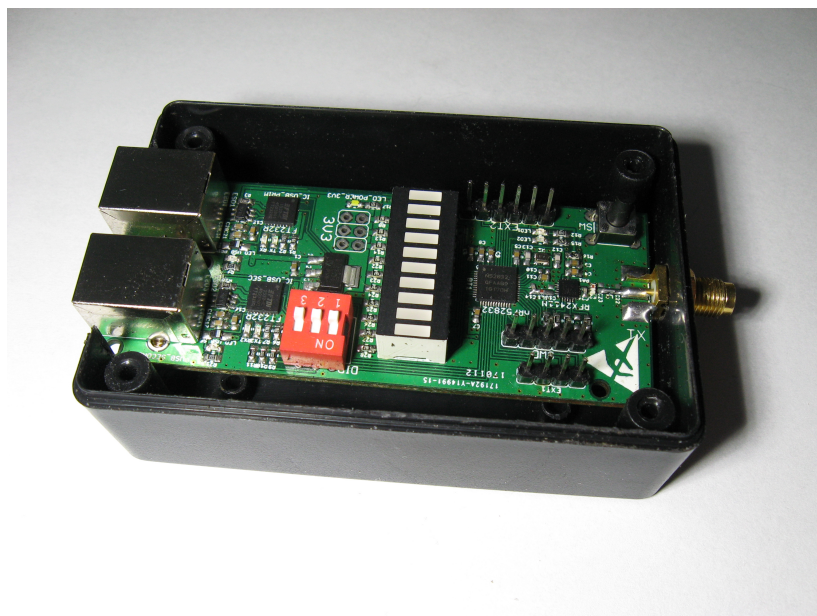


Obr. B.5: Činitel odrazu vysílače - S11

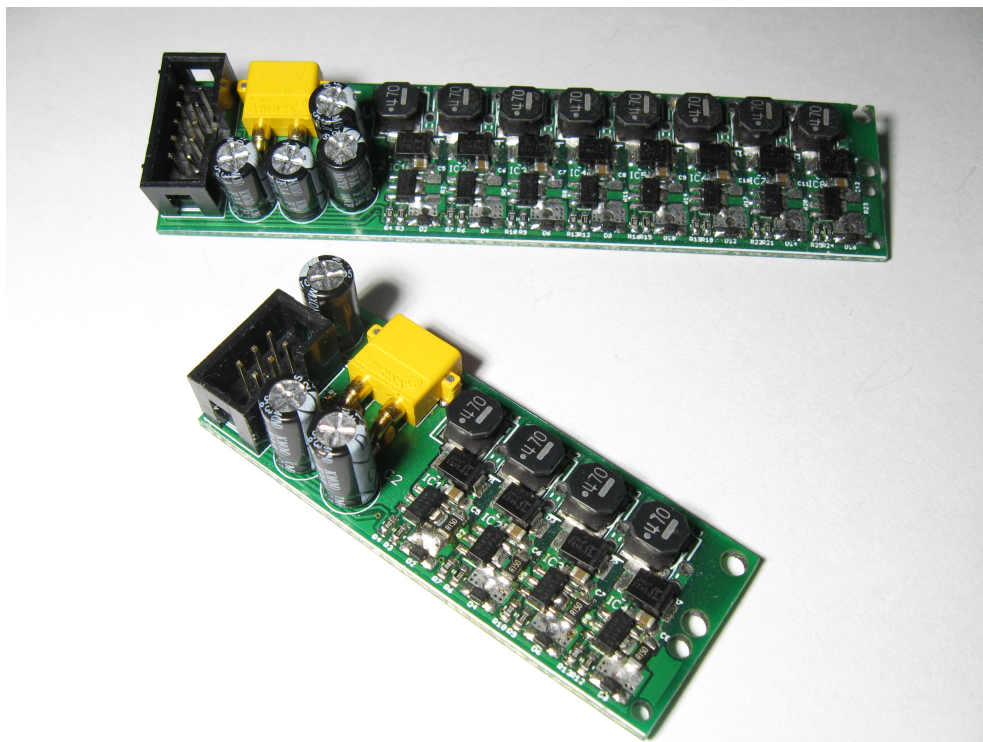
## C FOTODOKUMENTACE



Obr. C.1: Přijímač bez krabičky



Obr. C.2: Vysílač v krabičce bez krytu



Obr. C.3: Budiče LED



Obr. C.4: Fotka z vystoupení - Medúzy